



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ  
STRUKTUROVANÉHO MATERIÁLU VYROBENÉHO  
TECHNOLOGIÍ KOVOVÉHO 3D TISKU**

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF LATTICE STRUCTURES MADE BY 3D METAL PRINTING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Pliska

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Radek Vrána

**BRNO 2017**



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Jan Pliska</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Radek Vrána</b>
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Hodnocení mechanických vlastností strukturovaného materiálu vyrobeného technologií kovového 3D tisku

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při modelování mechanického chování pomocí metody konečných prvků je nutné pracovat s reálnými vlastnostmi (materiálovými konstantami) použitých materiálů. Jedině tak je možné docílit shody mezi predikcí a reálnými mechanickými vlastnostmi konkrétního dílu. Zjištění reálných mechanických vlastností strukturovaného materiálu umožní predikovat vlastnosti nejen samotného strukturovaného materiálu, ale i dílů které kombinují strukturovaný a objemový materiál.

Typ práce: výzkumná

**Cíle bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je nalezení materiálových konstant strukturovaného materiálu tvořeného základními prutovými i prostorovými buňkami.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše v oblasti mechanických vlastností strukturovaného materiálu,
- nalezení vhodných kritérií pro porovnání strukturovaného materiálu,
- vyhodnocení již provedených experimentů a stanovení závěrů,
- vytvoření skriptu v programu excel, pro vyhodnocování mechanických testů strukturovaného materiálu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J.P. KRUTH. Mechanical Properties of AISi10Mg Produced by Selective Laser Melting. Physics Procedia. 2012, vol. 39, s. 439-446.

BRANDL, E., U. HECKENBERGER, V. HOLZINGER a D. BUCHBINDER. Additive manufactured AISi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. Materials. 2012, vol. 34, s. 159-169.

QIU, Ch., S. YUE, N. J.E. ADKINS, M. WARD, H. HASSANIN, P. D. LEE, P. J. WITHERS a M. M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering: A [online]. 2015, vol. 628, s. 188-197 [cit. 2015-03-24].

TSOPANOS, S., R. A. W. MINES, S. MCKOWN, Y. SHEN, W. J. CANTWELL, W. BROOKS a C. J. SUTCLIFFE. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2010, vol. 132, issue 4, s. 041011.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

---

## ABSTRAKT

---

Aditivní výrobní technologie umožňují výrobu tvarově komplexních struktur, které jsou běžnými postupy vyrobitelné jen velmi obtížně. Jednou z těchto struktur je i mikroprutová struktura složená z periodicky se opakujících prutových buněk.

Tato práce se zabývá shrnutím dosavadních poznatků v oblasti mechanických vlastností mikroprutových struktur vyrobených metodou Selective Laser Melting a jejich testování. Dalším cílem bylo nalezení vhodných kritérií pro porovnání strukturovaného materiálu. Z hodnot získaných při materiálových testech reálných těles byly získány veličiny nutné k výpočtu hledaných materiálových konstant. Pro tento účel byl vytvořen skript v programu MS Excel. Provedeným výzkumem byly zjištěny hlavní faktory ovlivňující mechanické vlastnosti mikroprutových struktur. Na základě údajů a závislostí prezentovaných v této práci je možné porovnání strukturovaného materiálu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

---

Mikroprutové struktury, mřížová struktura, Selective Laser Melting, AlSi10Mg, mechanické vlastnosti, materiálové konstanty, vyhodnocení, porovnání

## ABSTRACT

---

Additive manufacturing technologies allow manufacturing of complex structures which are near impossible to manufacture by other more conventional technologies. A fine example of these complex structures is a periodic metallic micro-cellular structure

This bachelor thesis is focused on summarization of known mechanical behaviour of lattice structures manufactured via Selective Laser Melting. This study also investigates suitable comparison criteria for lattice structures. Required values for determination of material constants were obtained from mechanical testing of real specimens. For faster evaluation of mechanical testing, automatic script in MS Excel was created. Research showed up some of the major parameters characterising the mechanical behaviours of lattice structures. It is possible to compare qualities of lattice structures based on criteria presented in this work.

## KEYWORDS

---

Microstrut structures, lattice structures, Selective Laser Melting, AlSi10Mg, mechanical properties, material constants, evaluation, comparison

---



---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLISKA, J. *Hodnocení mechanických vlastností strukturovaného materiálu vyrobeného technologií kovového 3D tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vrána.

---





---

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Hodnocení mechanických vlastností strukturovaného materiálu vyrobeného technologií kovového 3D tisku*. Jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Radka Vrány. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 19. května 2017

.....  
Podpis autora

---



---

"This bachelor thesis was elaborated with support and by using research equipment of NETME Centre, regional research and development center built with the financial support from the Operational Program me Research and Development for Innovations within the project NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and, in the follow-up sustainability stage, supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by financial means from the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Program me I“

## **PODĚKOVÁNÍ**

---

Tímto bych chtěl obzvláště poděkovat Ing. Radku Vránovi za trpělivost a vstřícný přístup při zpracovávání práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a přítelkyni za podporu při studiu.

---



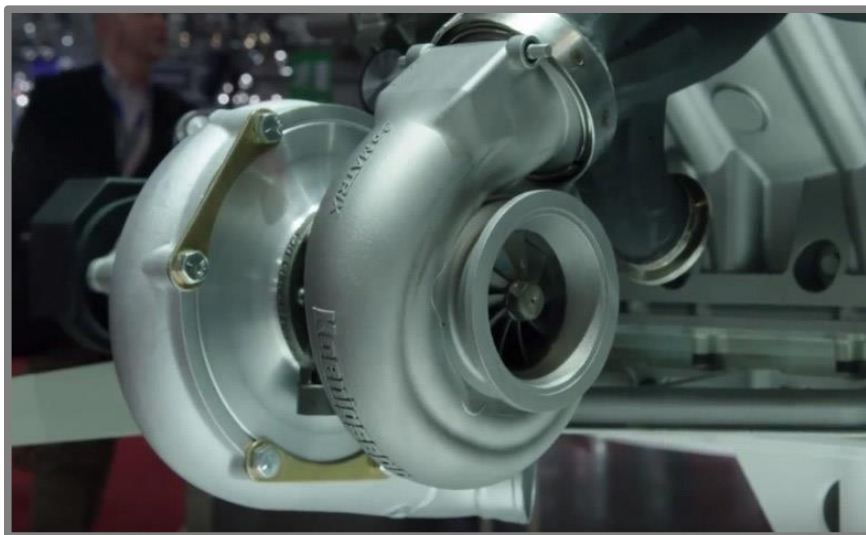
## **OBSAH**

---

<b>OBSAH</b>	<b>11</b>
<b>1. ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1 Selective Laser Melting	14
2.1.1 Princip metody SLM	14
2.1.2 Materiály pro využití v SLM	15
2.2 Analýza struktur, vzorků a jejich testování	17
2.3 Materiálový model	27
2.3.1 Materiálový model Johnson – Cook	27
2.3.2 Kritérium selhání Johnson – Cook (failure model)	28
<b>3. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>29</b>
3.1 Cíle bakalářské práce	30
<b>4. MATERIÁL A METODY</b>	<b>31</b>
4.1 Materiál	31
4.2 Zařízení SLM 280 <sup>HL</sup>	31
4.3 Materiálové testování	32
4.4 Vyhodnocení testů	33
4.4.1 Tahová zkouška mikroprutových těles	33
4.4.2 Tlaková zkouška mikroprutových struktur	36
<b>5. VÝSLEDKY</b>	<b>40</b>
5.1 Výsledky tahové zkoušky	40
5.1.1 Mez pevnosti v tahu	40
5.1.2 Smluvní mez kluzu	41
5.1.3 Modul pružnosti	41
5.2 Výsledky tlakové zkoušky	42
5.2.1 Mez pevnosti v tlaku	42
5.2.2 Modul pružnosti struktury	43
<b>6. DISKUZE</b>	<b>45</b>
<b>7. ZÁVĚR</b>	<b>47</b>
<b>8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>48</b>
<b>9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>51</b>
<b>10. SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>52</b>
<b>11. SEZNAM TABULEK</b>	<b>54</b>
<b>12. SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>55</b>

## 1. ÚVOD

Aditivní výrobní technologie (Additive Manufacturing technologies, AM) se v posledních letech staly velmi oblíbeným inovativním způsobem výroby nejen strojních součástí z polymerů a kovů. Do technické praxe začaly AM pronikat na konci 80. let při výrobě prototypů. Na přelomu tisíciletí pak aditivní výrobní technologie našly uplatnění v oblasti výroby finálních výrobků díky nižší ceně, vývoji materiálů a vylepšené spolehlivosti. V případě kovových produktů k rozšíření tohoto způsobu výroby přispěl vývoj a zavedení dostatečně silných energetických zdrojů (laserů). V dnešní době již AM v některých oblastech lékařství, kosmického průmyslu, vrcholového motorsportu (viz obr. 1.1) a dalších oblastech zcela nahradily konvenční zpracování kovu jako kování či odlévání [1,18]. Hlavními výhodami těchto výrobních technologií jsou schopnost vyrobit tvarově velmi složité díly, kombinace několika součástí do jednoho celku, a možnost velmi pružně reagovat na změny konstrukčního provedení. V praxi jsou nejběžnějšími aditivními výrobními technologiemi metody Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM) a Selective Laser Melting (SLM). Všechny tyto metody spočívají v natavování materiálu vrstvu po vrstvě, čímž vzniká hotový díl.

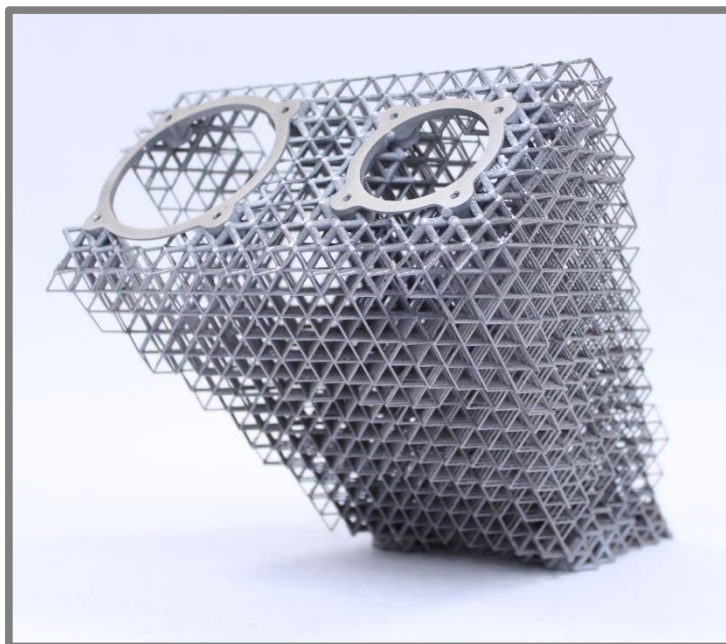


**Obr. 1.1** Unikátní variabilní turbodmychadlo automobilky Koenigsegg vyrobené pomocí technologie kovového 3D tisku. Patentovaný systém vnitřních kanálů je konvenčním způsobem nevyrobitelný. [2]

Díky těmto metodám bylo možné zapojit do návrhu součástí mimo jiné i komplexní mikroprutové struktury, které nejsou konvenčními výrobními technologiemi vyrobitelné. Tyto struktury jsou tvořeny periodicky se opakujícími prutovými buňkami (viz obr. 1.2). [1,18]

Inspiraci pro tvary a využití těchto struktur můžeme nalézt v přírodě, ať už jde o lidské kosti nebo duté kmeny bambusu. Výhodou použití mikroprutových stuktur (lattice structures), popřípadě jejich kombinací s plným materiálem lze docílit

požadované pevnosti a tuhosti dílu, ale s výrazně sníženou hmotností oproti součásti z plného materiálu.



**Obr. 1.2** Ultralehká konzola komunikačních antén satelitu vyrobená metodou SLM [4]

Zatímco pro topologie buněk jsou již relativně prozkoumanou oblastí, mechanické chování mikroprutových stuktur je specifické pro různé typy zatěžování a nebylo ještě zcela jasně popsáno. Aby bylo možné analyzovat a predikovat toto chování pomocí matematického modelu (například s využitím Metody Konečných Prvků) je nutné určit materiálové konstanty použitého materiálu. Díky simulacím mechanického chování součástí je při návrhu možné testovat velké množství variant bez nutnosti výroby dílu. Tím dochází k výrazné úspoře času a finančních prostředků, které by jinak musely být vynaloženy na výrobu prototypů a jejich následné testování.

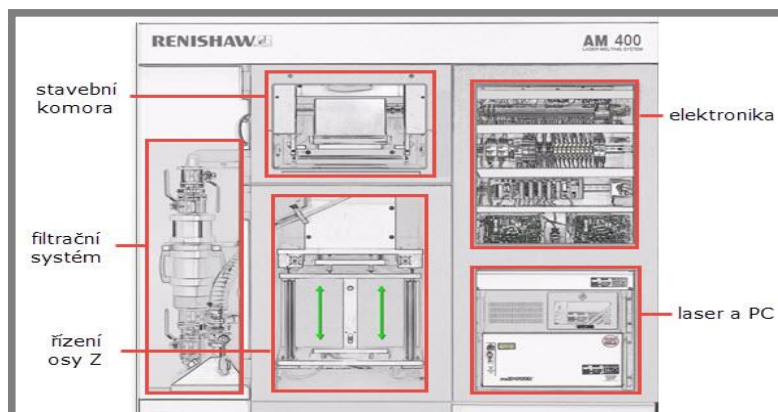
Tato práce se zabývá nalezením vhodných kritérií pro porovnání mechanických vlastností mikroprutových struktur vyrobených metodou SLM a jejich automatickým vyhodnocením z reálných materiálových testů.

## 2.1

### 2.1.1



Schéma celého zařízení je vyobrazeno na obrázku 2.2.

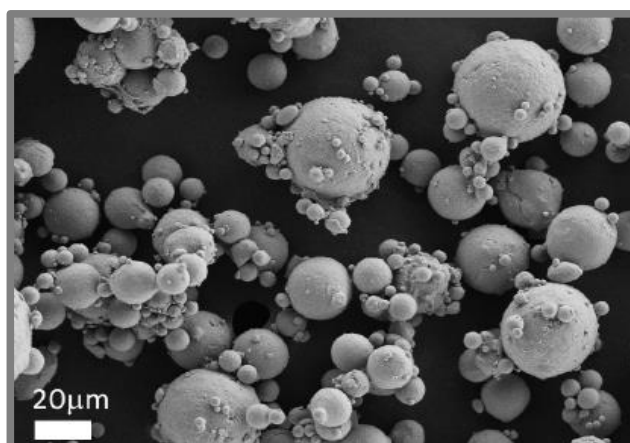


Obr. 2.2 Schéma výrobního zařízení (typ Renishaw AM400) [3]

### 2.1.2 Materiály pro využití v SLM

2.1.2

Mechanické vlastnosti konečného výrobku závisí především na použitém materiálu. Při volbě struktury prášku se upřednostňuje kulovitý tvar částic, který zajišťuje dobrou tekutost a homogenní složení směsi, čímž usnadňuje nanesení prášku do souvislé vrstvy (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3 Mikrostruktura hliníkového prášku [1]

Mezi materiály zpracovatelné metodou SLM patří mimo jiné **titan**, který je díky své pevnosti, odolnosti proti korozi a nízké teplotní roztažnosti významným výrobním materiálem zejména v leteckém a kosmickém průmyslu. Titan se využívá i v lékařství díky dobré biokompatibilitě s lidským organismem například při výrobě protéz. Nejběžněji využívaná slitina titanu je Ti6Al4V. Mezi její přednosti patří dobré mechanické vlastnosti a dlouholeté zkušenosti s jejím zpracováním.

Dalším využívaným materiálem jsou **nástrojové a nerezové oceli**. Jejich výhodami jsou vysoká tvrdost, korozivzdornost a odolnost proti opotřebení. 3D tisk nástrojových ocelí umožňuje například integraci chladících kanálů přímo dovnitř

nástrojů nebo forem, což by bylo konvenčními metodami neuskutečnitelné. Příkladem zpracovatelné nerezové oceli je 316L.

Důležitým materiálem využívaným pro výrobu metodou SLM je **hliník**. Jeho nízká hustota a dobrá zpracovatelnost se využívají v leteckém a automobilovém průmyslu. Pro svou dobrou zpracovatelnost hraje hliník důležitou roli i při výrobě prototypů. Kvůli své nízké pevnosti je hliník využíván zejména ve formě slitin. Typickým příkladem příměsí je křemík, hořčík, měď a mangan. Nejběžněji využívané slitiny jsou AlSi10Mg a AlSi12.

Dalším příkladem můžou být **kobalto-chromové slitiny**. Díky své vysoké tvrdosti, tuhosti, biokompatibilitě a odolnosti proti korozi jsou ve spojení s technologií SLM ideální pro využití v lékařství. Postupem času se tyto slitiny například staly standardním materiálem pro zubní náhrady. Vysoká odolnost proti tepelnému zatížení kobalto-chromových slitin je navíc využívána při výrobě proudových motorů.

**Slitiny na bázi niklu** zpracovávané metodou SLM jsou díky své dobré pevnosti i při vysokých teplotách a výborné svařitelnosti ideálním materiálem při výrobě turbín a v leteckém průmyslu (viz obr. 2.4). Ve většině případů jsou slitiny tvořeny příměsemi železa, niobu, molybdenu a dalších prvků, všeobecně známých pod názvem superslitiny. [19]

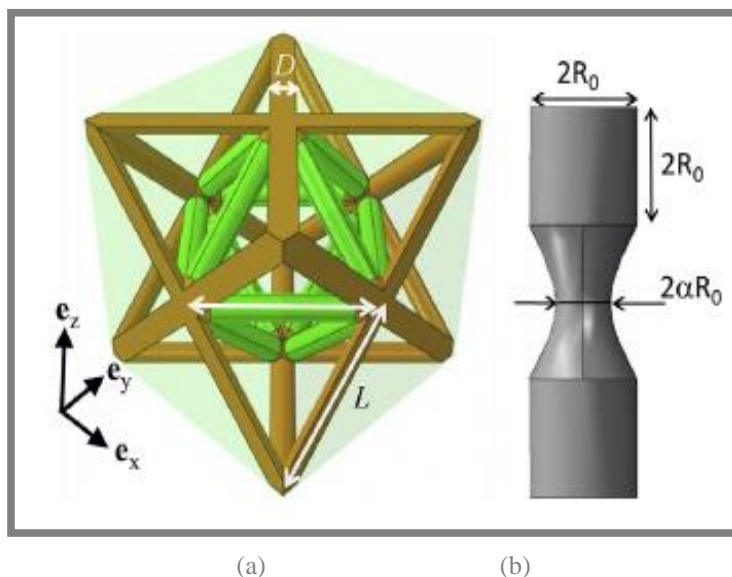


**Obr. 2.4** Lopatky turbín s vnitřními chladicími kanály vyrobené ze superslitiny [19]

## 2.2 Analýza struktur, vzorků a jejich testování

2.2

**Tancogne-Dejean et al. (2016)** [6] vyšetřovali vlastnosti a chování vzorků strukturovaného materiálu vyrobeného metodou SLM s buňkami tvaru oktaedrické BCC (Body Centred Cubic) mřížky (viz obr. 2.5).



Obr. 2.5 (a) Buňka oktaedrické (BCC) mřížky, (b) geometrie prutu [6]

Základními kritérii buňky je zejména délka a průměr prutů tvořících buňku. V návaznosti na tato kritéria se dále vyvozují parametry, které popisují vlastnosti a chování struktury. Mezi tyto parametry patří:

**Relativní hustota** – Relativní hustota  $\bar{\rho}$  je definována jako poměr hustoty struktury a plného materiálu. Tento poměr je analyticky popsán rovnicí

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_s}. \quad (2-1)$$

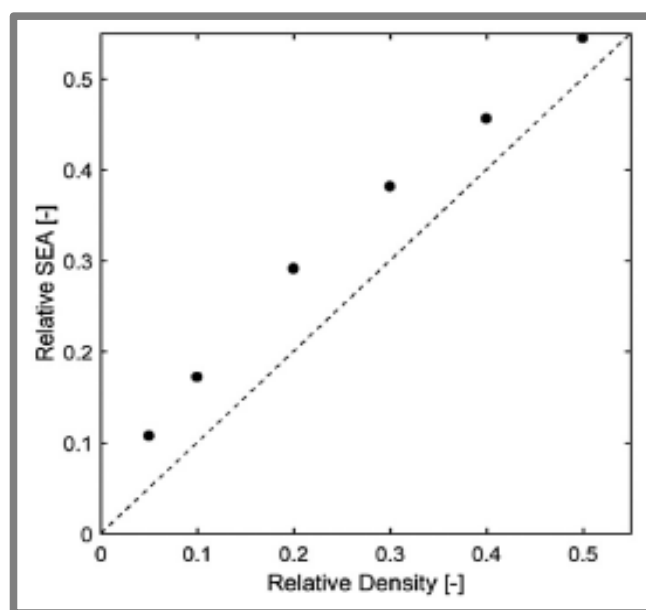
Pro oktaedrickou mřížku s válcovými pruty o poloměru  $R$  a délky  $L$  byl vyvozen analytický vztah pro výpočet nízkých relativních hustot vzorků:

$$\bar{\rho} = 6\sqrt{2\pi} \left(\frac{R}{L}\right)^2. \quad (2-2)$$

**Měrná absorbovaná energie** – (Specific energy absorption, SEA)  $\psi$  je definována schopnost absorpce energie (práce) spotřebované k deformaci na jednotkou váhy materiálu při jednoosém tlakovém zatížení.

$$\psi = \frac{W}{\rho} \text{ pro } W = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (2-3)$$

Kde  $W$  značí práci a  $\rho$  hustotu strukturovaného materiálu,  $\sigma$  axiální napětí a  $\epsilon$  axiální deformaci prutu.



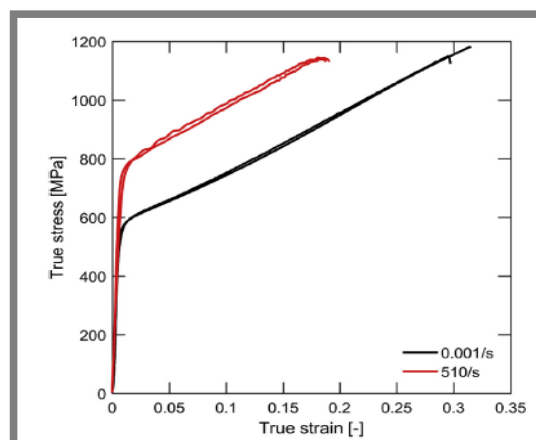
Obr. 2.6 Měrná absorbovaná energie jako funkce relativní hustoty nemodifikovaných prutů [6]

Autoři vyhodnocovali vzorky různé relativní hustoty a tvaru prutů při zachování jejich kruhového průřezu. Pruty byly u některých vzorků modifikovány vrubem o různém průměru daným koeficientem  $\alpha$  s plynulým parabolickým přechodem, přičemž vrub se vždy nacházel ve středu prutu.

Vzorky pro statické a dynamické tlakové zkoušky byly tvaru krychle o hraně 21,5 mm a válce o průměru 8,9 mm a délce 7,8 mm s osou shodnou se směrem stavby.

Autoři testovali válcové i krychlové vzorky pomocí hydraulické MTS testovací aparatury vybavené paralelními vysokopevnostními zatěžovacími povrchy. Statické experimenty pro krychlové vzorky byly prováděny při rychlosti zatěžování 1 mm/min. Dynamické testování bylo provedeno pomocí Hopkinsonova testu (Split Hopkinson Pressure Bar). Tento test spočívá v umístění vzorku mezi dvě tyče vyrobené z tvrzené oceli, kdy je následně v osové směru na střed vstupní tyče vystřelen vysokou

rychlostí impaktor. Pomocí systému tenzometrů (kapacitorů) umístěných na vstupní a výstupní tyči je zaznamenáván průběh rázu v tyčích.

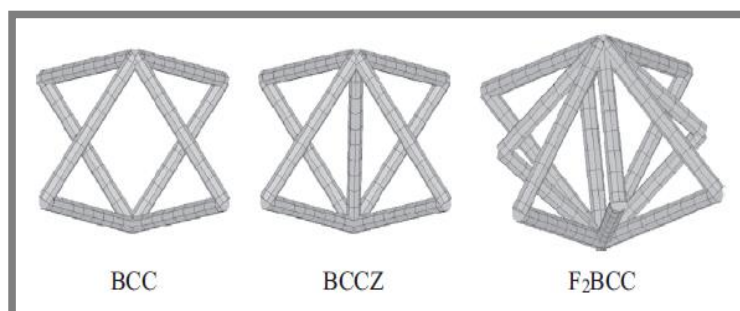


Obr. 2.7 Vliv rychlosti zatěžování na chování materiálu [6]

Závěry práce mimo jiné prokázaly, že při relativní hustotě větší než 30% u vzorků s oktaedrickou mřížkou má křivka zatěžování při tlakových zkouškách lineární průběh. Dále pak, že měrná absorbovaná energie je přímo úměrná relativní hustotě. (viz obr. 2.6). V neposlední řadě také prokázala rozdílné chování materiálu při statickém a dynamickém zatížení (viz obr. 2.7).

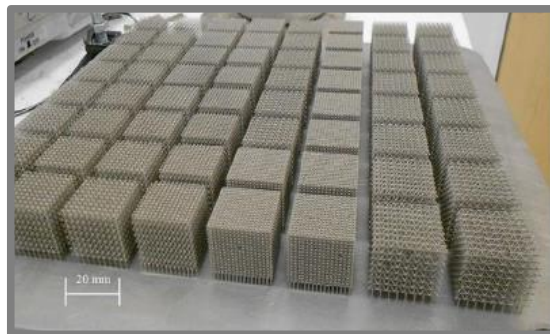
- Typ buňky: Oktaedrická BCC
- Typ testovacího tělesa: Válec, krychle, proměnná geometrie prutů
- Typ zatěžování: Tlak

**Gümrük et al. (2013)** [7] se zabývali obecnými mechanickými vlastnostmi struktur vyráběných metodou SLM. Experimentálními metodami bylo vyšetřováno chování vybraných struktur při různých typech zatížení a okrajových podmínkách. Pro tyto experimenty byly vybrány tři typy mřížek: Kubická prostorově středěná mřížka (Body centred cubic, BCC), Kubická prostorově středěná mřížka vyztužená ve směru osy z (BCCZ) a Kubická prostorově středěná mřížka speciální, kdy se jedna buňka skládá ze dvou BCC buněk otočených vůči sobě o 45 stupňů ( $F_2$ BCC) (viz obr. 2.8).



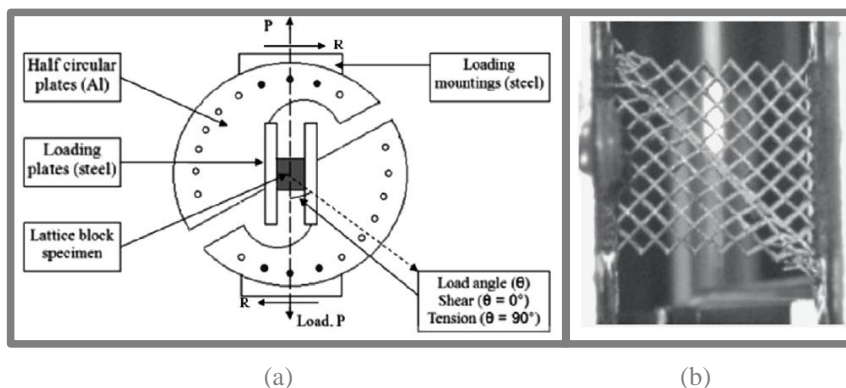
Obr. 2.8 Typy použitých mřížek [7]

Testovacími vzorky byly zvoleny krychlové bloky o délce hrany 20 mm a průměrem nosníků 0,2 mm s různou velikostí hrany a topologií buněk dle popisu výše (viz obr. 2.9), což mělo za následek i odlišnou relativní hustotu u jednotlivých konfigurací.



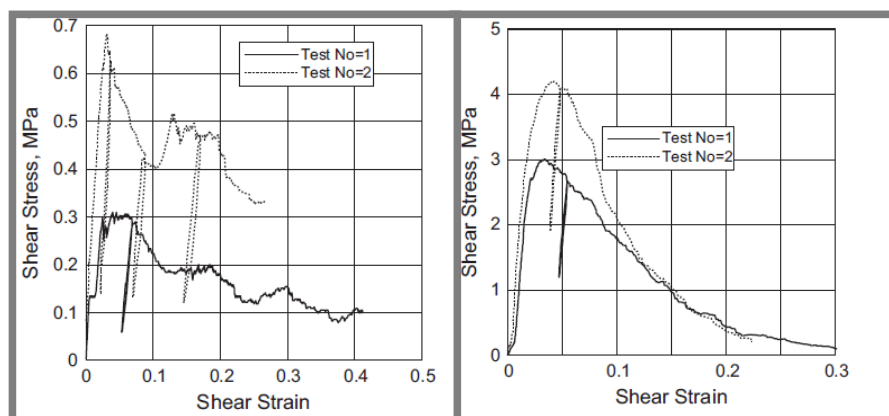
**Obr. 2.9** Série bloků s různou velikostí buněk (velikost 20 x 20 x 20 mm) [7]

Autoři článku [7] provedli dvě sady testů krychlových zkušebních bloků. První sada byla testována aparaturou Arcan (viz. Obr. 2.10). Aparatura se skládá ze dvou půlkruhových upínacích stolů s dírami, které umožňují natáčení osy zatěžování k orientaci mřížky. Bloky byly připevněny ke dvěma ocelovým plátům pomocí lepidla. Touto metodou bylo provedeno testování bloků na smyk a tlakové zkoušky s omezenou možností deformace vzorku tak, aby nedocházelo k vybočení.



**Obr. 2.10** (a) Schematické znázornění testovací aparatury Arcan, (b) Ukázka testování na smyk [7]

Smykové zkoušky prokázaly značně odlišné chování strukturovaného materiálu při deformaci smykem oproti tahovým i tlakovým zkouškám (viz obr. 2.11). Materiál dosahuje maximální hodnoty zatěžující křivky na začátku testu a následně ztrácí schopnost odolávat napětí. Dále se projevila závislost na velikosti buňky, kdy u větších buněk měla zatěžující křivka tendence k vyrovnaní, kdežto u menších buněk křivka plynule klesala.

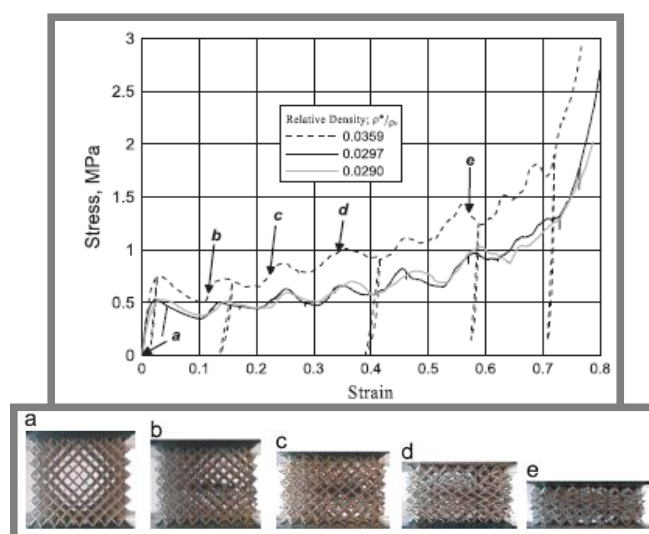


(a)

(b)

**Obr. 2.11** Výsledné zatěžovací křivky ze zkoušky smykem pro buňku velikosti (a) 2,5 mm (b) 1,25 mm [7]

Křivka zatěžování tlakového testu s omezenou deformací měla vzestupnou tendenci s několika lokálními minimy a maximy (viz obr. 2.12) souvisejícími s postupným hroucením jednotlivých vrstev buněk. Jako první se začaly hroutit buňky nacházející se uprostřed vzorku.

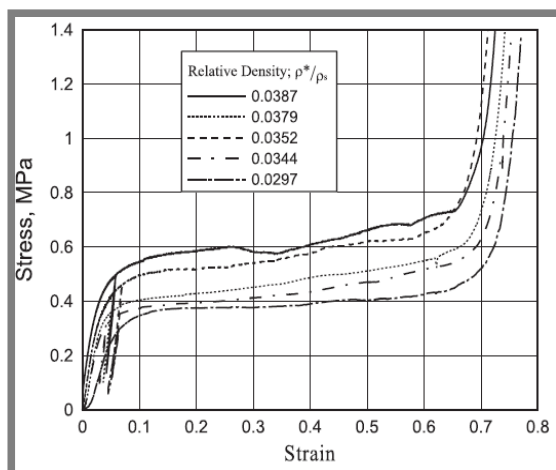


**Obr. 2.12** Zatěžovací křivka tlakové zkoušky s omezenou deformací a příslušný stav vzorku (BCC) [7]

Druhá sada testů byla provedena na univerzálním testovacím zařízení Instron 4024. Tyto testy měly za cíl odhalit chování strukturovaného materiálu při deformaci tahem a tlakem bez omezení deformace.

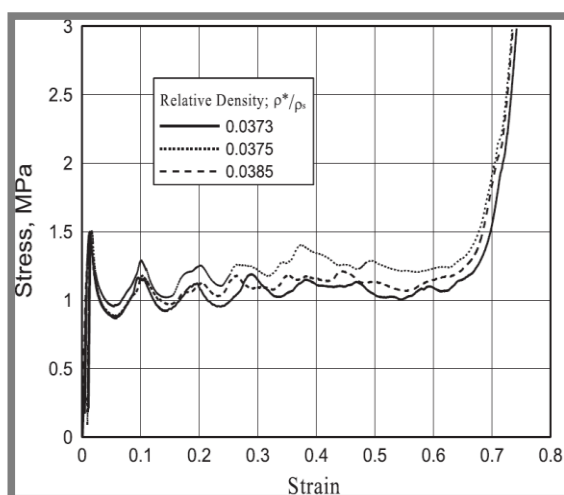


Zatěžovací křivky vzorků s BCC strukturou prokázaly vliv relativní hustoty vzorku a ukazují dobrou opakovatelnost testů pro stejnou velikost buněk. Obecně řečeno, křivky naznačují elasticko-plastickou oblast plynule přecházející z oblasti elastické deformace. Následuje oblast plastické deformace, kde se napětí zvyšuje téměř lineárně. Konec lineární plastické deformace značí počátek oblasti zpevňování, kdy se pruty začínají dostávat do vzájemného kontaktu (viz obr. 2.13).



**Obr.2.13** Zatěžovací křivka tlakového testu bez omezení deformace (BCC, velikost buňky 2,5 mm) [7]

**Gümük et al.** na základě tlakových testů prokázali, že hodnoty napětí vzrůstají s velikostí buňky, a naopak napětí při zpevnění projevuje s rostoucí velikostí buňky klesající tendenci. Dále pak poukázali na fakt, že se zvyšující se relativní hustotou vzorku se přímo úměrně zvyšuje nebo snižuje úroveň zatěžovací křivky (viz obr. 2.14).



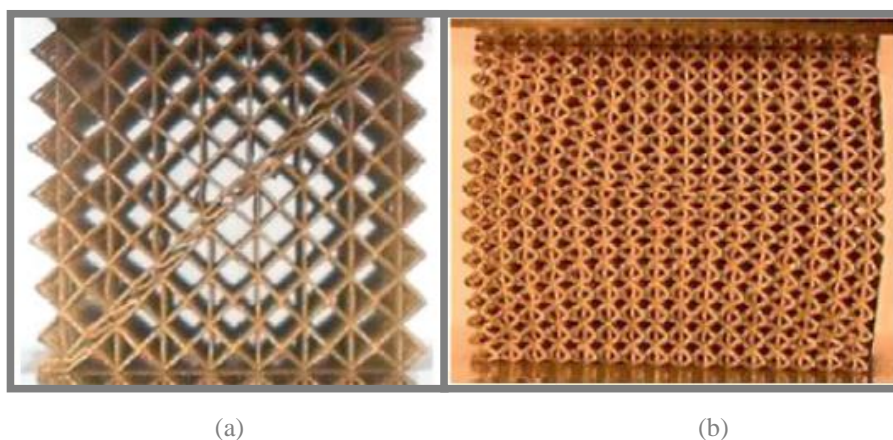
**Obr. 2.14** Zatěžovací křivka tlakového testu bez omezení deformace (BCCZ, velikost buňky 2,5 mm) [7]

Testy bloků s BCCZ strukturou prokázaly značně odlišné chování od vzorků se strukturou BCC. Napětí ve vzorcích dosahuje maximálních hodnot již při velmi



malých deformacích a následně opět klesá, než dosáhne dalšího extrému. Tento fenomén však postupně mizí se zmenšující se velikostí buněk. Obecné mechanické vlastnosti BCCZ struktur v závislosti na relativní hustotě se shodují s BCC vzorky.

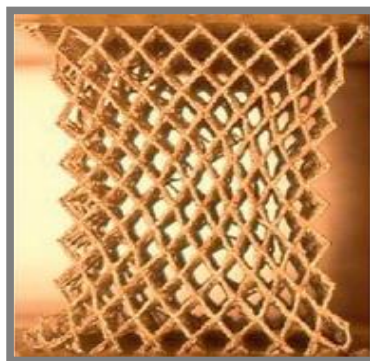
V závislosti na velikosti buňky se u BCCZ struktur mění i ráz deformace. U vzorků s většími buňkami docházelo k deformacím v diagonálním směru pod úhlem 45 stupňů, kdežto u vzorků s menšími buňkami byla dominantní deformace uprostřed bloku. Toto je zapříčiněno tím, že je celá soustava namáhána jednak ohybem a navíc smykem pod úhlem 45 stupňů. V prvním případě je součet obou zatížení největší právě v diagonále, a proto v tomto místě pruty na ohyb selžou a dojde k vybočení. V druhém případě je soustava namáhána stejně. Vlivem menší délky prutů, a tím pádem menší délky ramen pro ohybové zatížení, dojde ke zmenšení ohybového namáhání a odolnost struktury proti deformaci je proto vyšší (viz obr. 2.15).



**Obr.2.15** Porovnání deformace mřížky BCCZ o velikosti buňky (a)2,5 mm, (b)1,25 mm [7]

Vzorky s  $F_2$ BCC strukturou vykazovaly ve smyslu deformačních mechanismů podobné charakteristiky jako vzorky s mřížkou BCCZ. U bloků s většími buňkami se opět projevila jako dominantní deformace v diagonálním směru, ale v porovnání s BCCZ mřížkou přechod k dominantní deformaci uprostřed bloku nastal se zmenšující velikostí buněk výrazně dříve. Tento trend autoři vysvětlují tím, že s  $F_2$ BCC struktura obsahuje dvakrát více prutů než BCCZ.

Zkoušky tahem byly provedeny na dvou sadách vzorků s BCC mřížkou a různou relativní hustotou. Výsledky experimentu ukázaly velký vliv relativní hustoty

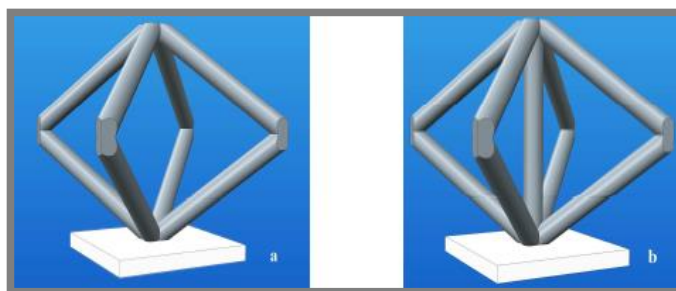


**Obr. 2.16** Tahová zkouška (BCC, 2,5mm) [7]

na chování struktury. Kvůli nedokonalostem povrchu vyplývající z principu metody výroby jsou mikroprutové struktury velmi citlivé na vznik a šíření trhlin z takto vzniklých vrubů. Vzorčky s menší relativní hustotou vykazovaly relativně náhlou ztrátu integrity zapříčiněnou právě malým průměrem prutů. Na vzorcích s většími buňkami lze během deformace pozorovat zřetelné zúžení uprostřed bloku (viz obr. 2.16).

- Typ buňky: BCC, BCCZ, F<sub>2</sub>BCC
- Typ testovacího tělesa: Krychle
- Typ zatěžování: Tlak (s omezenou možností deformace), tlak, smyk, tah (bez omezení deformace)

**Mager et al. (2013)** [8] se ve své práci zabývali výzkumem strukturovaného materiálu vyrobeného metodou SLM z hlediska vyrobiteľnosti a optimalizace mechanických vlastností. Cílem bylo zanalyzovat základní principy a vztahy pro další využití při vývoji implantátů s mechanickými vlastnostmi, které by byly podobné kostem a které by se díky porézní struktuře snadno integrovaly do lidského těla prorůstáním živé tkáně implantátem. Bylo posuzováno chování vzorků s mřížkou typu BCC a BCCZ (viz obr. 2.17) s velikostí buňky od 0,5 do 1,2 milimetrů.

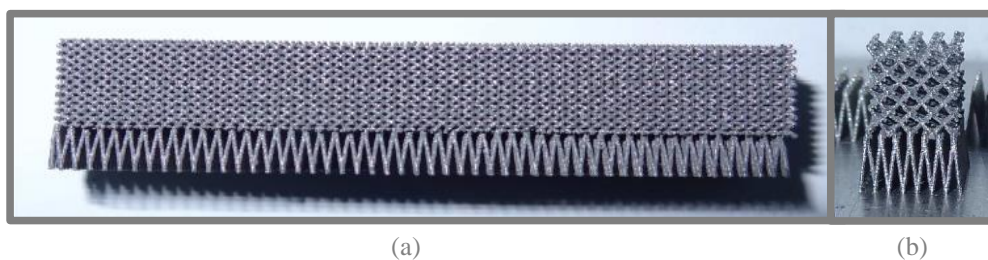


Obr. 2.17 Buňka BCC (a) a buňka BCCZ(b) [8]

Důležitým faktorem při navrhování vzorků byla tzv. **Porozita**. Porozita vzorku je matematicky popsána rovnicí:

$$P = 100 \% * \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_0}\right) \quad (2-4)$$

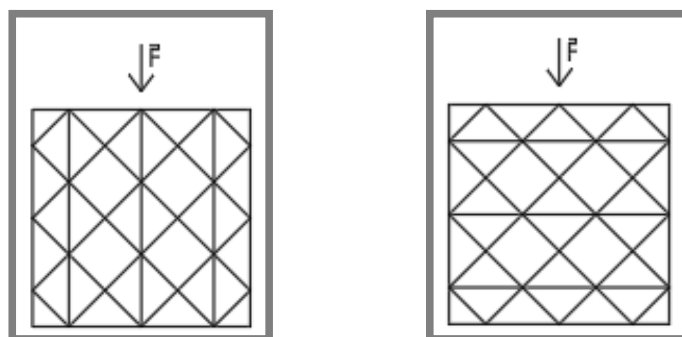
Kde  $\rho_s$  značí hustotu vzorku získanou z poměru váhy vzorku a jeho objemu a  $\rho_0$  hustotu plného materiálu.



Obr. 2.18 Podpůrné konstrukce vzorků pro ohybové testy (a) a tlakové testy (b) [8]

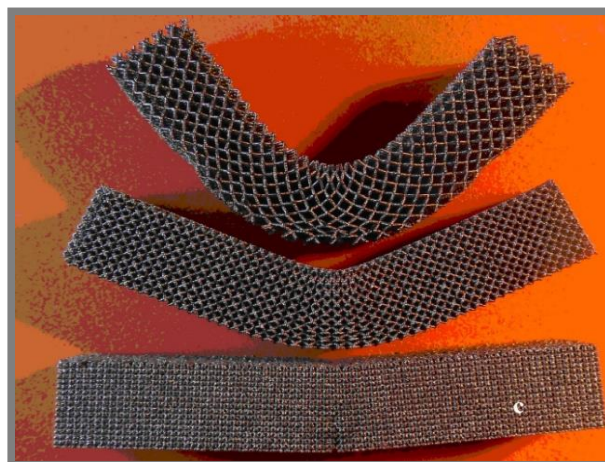
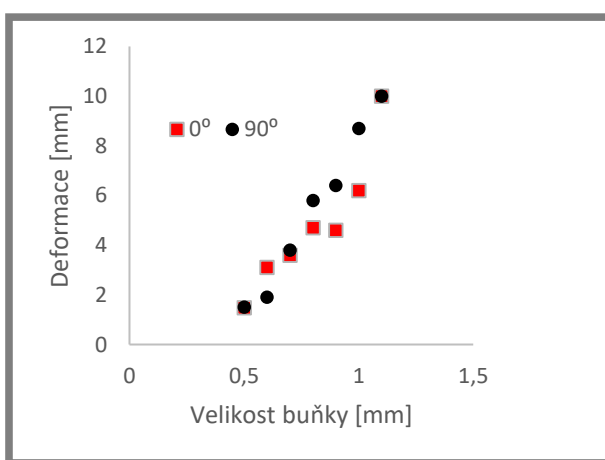
Pro experiment byly zvoleny dva typy vzorků: standartní krychlový vzorek o hraně 5 milimetrů pro tlakové testy a zkušební těleso tvaru kvádrů o rozměrech 7x7x40 milimetrů pro ohybové testy. K minimalizaci ovlivnění vzorku odpadním teplem vznikajícím při výrobě byla zvolena metoda podpůrných konstrukcí (viz obr. 2.18). Tyto podpory byly po ukončení výroby odstraněny.

Autoři dále provedli řadu testů pomocí zkušebního zařízení Instron 3366 za konstantní rychlosti zatěžování 0,5mm/min. Při tlakových zkouškách byla zatěžující síla aplikována pod úhlem 0°, respektive 90° vzhledem orientaci buňky (viz obr. 2.19). Testy prokázaly značný rozdíl tlakových napětí při odlišné orientaci zatěžující síly. Vzorky, u kterých byla síla aplikována v kolmém směru, vykazovaly výrazně menší hodnoty napětí než vzorky, u kterých byla síla aplikována v rovnoběžném směru s podpůrnou rovinou, a to u všech velikostí buněk. Z výsledků také vyplývá, že napětí klesá se zvyšující se velikostí buněk.



Obr. 2.19 Orientace zatěžující síly pod úhlem 90° (vlevo) a 0° (vpravo)

Ohybové testy probíhaly metodou třibodového ohybu, která spočívá v uložení vzorku na dvě pevné podpory v určité vzdálenosti a následným zatížením uprostřed tělesa. Během testování byla jasně pozorovatelná plastická deformace vzorků (viz obr. 2.20). Na základě experimentu bylo prokázáno, že se zvětšující se velikostí buněk dochází ke zvyšování míry deformace v důsledku působení zatěžující síly.

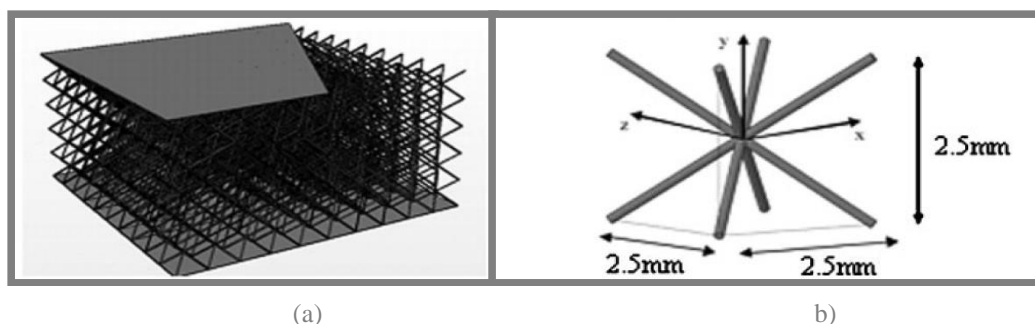


Obr. 2.20 Závislost velikosti deformace na velikosti a orientaci buňky vůči zatěžující síle (vlevo) a jasně patrná plastická deformace vzorků po ohybové zkoušce (vpravo) [8]

- Typ buňky: BCC, BCCZ
- Typ testovacího tělesa: Krychle, kvádr
- Typ zatěžování: Tlak, ohyb

**Labeas et al. (2013)** [9] ve své studii posuzovali mechanické vlastnosti vzorků typu laminárního (sendvičového) kompozitu (tzv. sandwich structures) s jádrem tvořeným strukturovaným materiálem vyrobeným metodou Selective Laser Melting. Sendvičové kompozity jsou široce využívány pro absorpci rázů vysokých i nízkých rychlostí, například při konstrukci dopravních prostředků či pozemních staveb. Samotné jádro je schopno absorbovat energii rázu postupnou deformací struktury, zatímco vnější souvislé vrstvy slouží k rovnoměrnému rozložení svislého rázu na zasaženou plochu a zajišťují celkovou torzní tuhost součásti.

Tato studie se zabývá testováním sendvičových vzorků složených z jádra tvořeného strukturou složenou z periodicky se opakujících buněk typu BCC (body centred cubic) s pruty o průměru 0,2 mm a délce 3 mm, umístěného mezi dva panely tvořené matricí z epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny (viz obr. 2.21). Vzorky o rozměrech 150 x 150 x 47,6 mm byly opatřeny vnějšími panely o tloušťce 1,2 mm. Největším problémem při vytváření sendvičového kompozitu je zajištění dostatečně silné vazby mezi jádrem a vnějšími vrstvami. V tomto případě byly vnější pláty za tepla zalisovány do jádra, čímž se zajistila velmi dobrá vzájemná soudržnost.



**Obr. 2.21** a) Laminární (sendvičový kompozit) b) Struktura jádra je tvořena buňkami BCC [9]

Autoři provedli droptesty s různou energií dopadu pomocí zařízení Instron Dynatop 9250. Testovací vzorky byly umístěny na 4 pevné kulové podpory pro zajištění co nejjednodušších okrajových podmínek a zatěžující sílu představoval ocelový impaktor tvaru polokoule (viz obr. 2.22).

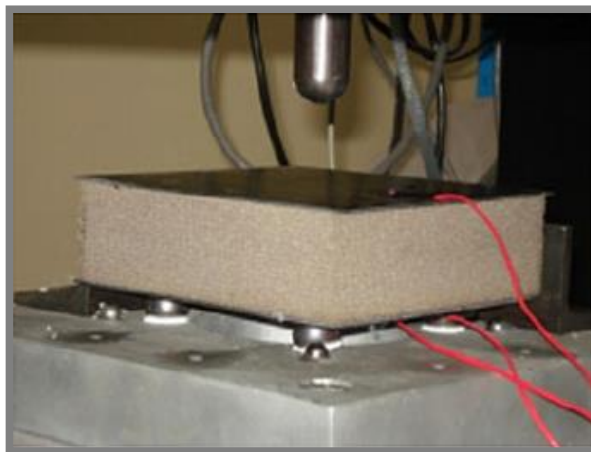
Motivací pro tuto studii bylo porovnání experimentálních výsledků s numerickým modelem využívajícím Metodu Konečných Prvků (Finite Element Method, FEM). Byly vytvořeny dva typy modelů: v prvním případě bylo jádro vymodelováno explicitně s jednotlivými pruty, kdežto v druhém jako jádro homogenizované.

Porovnáním výpočtové analýzy byla zjištěna dobrá korelace s experimentálně naměřenými daty z praktických testů. Model s homogenizovaným jádrem představoval výhodné řešení z pohledu výpočetního času i výkonu, oproti explicitnímu modelu, ale nebylo možné přesně namodelovat chování materiálu kvůli interpretaci buňky jako tuhého tělesa, a tím pádem zanedbání deformace a borcení jednotlivých prutů uvnitř buňky. Navíc tento model vyžaduje provedení náročných doplňujících



testů charakterizujících fyzikální vlastnosti jádra tak, aby bylo možné přesně nakonfigurovat vlastnosti modelu podobné s reálným vzorkem.

Součástí procesu modelování bylo i vytvoření **materiálového modelu**, kterým jsou interpretovány fyzikální vlastnosti materiálu.



Obr. 2.22 Vzorek připraven v testovacím zařízení [9]

- Typ buňky: BCC
- Typ testovacího tělesa: Kvádr (sendvičový typ)
- Typ zatěžování: Tlak (droptest)

## 2.3 Materiálový model

2.3

---

Matematický popis chování materiálu je základním požadavkem pro modelování mechanických vlastností materiálu pomocí analytických řešičů (např. MKP). Pro souhrnný popis chování materiálu při různém rázu deformace, rychlosti a teplotě se využívá složitých matematických modelů – tzv. konstitutivních rovnic. Konstitutivní rovnice se skládají z několika parametrů, které je nutné stanovit experimentální cestou. [10]

### 2.3.1 Materiálový model Johnson – Cook

2.3.1

---

Materiálový model Johnson-Cook byl sestaven v 80. letech pro popis dynamického zatěžování, jako jsou rázy, průstřely a výbušniny. [11] Je často využívaným modelem pro studium vysokých rychlostí deformace a velkých přetvoření, díky relativně nízkému počtu experimentálně stanovovaných parametrů.

Konstitutivní vztah (2-5) dle Johnson-Cooka je nejčastěji aplikován na materiály s BCC mřížkou. Materiálová křivka je dána rovnicí:

$$\sigma_y = (A + B * (\bar{\varepsilon}^p)^n * \left[ 1 + c \ln \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] * \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{ROOM}}{T_{MELT} - T_{ROOM}} \right)^m \right] \quad (2-5)$$

kde  $\sigma_0$ , B, C, n, m představuje pět experimentálně stanovených parametrů.

**2.3.2 Kritérium selhání Johnson – Cook (failure model)**

Model selhání se používá k modelování tvárných lomů materiálů pod velkým tlakem, rychlostí deformace a teplotou. Model předpokládá že, se poškození kumuluje během plastické deformace a začne se šířit po tom, co je překonána kritická hodnota  $D$  (damage parameter).  $D$  je definováno jako proměnná, která nabývá hodnoty 0 (materiál je nepoškozen) až 1 (úplný lom) [12].

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f} \quad (2-6)$$

Kritická hodnota  $D$  závisí na poměru celkového přetvoření  $\Delta \varepsilon$  a lomovém přetvoření, které je definováno rovnicí (2-7) v závislosti na triaxialitě zatížení, rychlosti deformace a teplotě v tomto pořadí:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] * [1 + D_4 \ln|\dot{\varepsilon}^p|] * [1 + D_5 T^*] \quad (2-7)$$

Konstanty  $D_1, \dots, D_5$  jsou materiálové (lomové) konstanty.  $\sigma^*$  je potom hodnota trojosého napjatosti (stress triaxiality ratio), a je určena jako  $\sigma_m / \sigma_y$ , kde  $\sigma_m$  je střední napětí. [13]

### 3. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

Aditivní výrobní technologie jsou nekonvenční metodou v oblasti výrobních technologií. Umožňují inovativní a efektivní navrhování součástí pro oblasti nejen ve strojním, ale i v lékařském průmyslu [1,8]. Jedním z technicky nejzajímavějších konstrukčních řešení vyrobitelných pomocí aditivních technologií je kombinace mikroprutové konstrukce s topologicky optimalizovanou nosnou částí. Toto řešení nabízí úsporu hmotnosti i materiálu oproti plným součástem při zachování obdobných mechanických vlastností (viz obr. 1.2). Pro úspěšnou integraci tohoto designu do výrobního procesu je nutná schopnost predikovat reálné mechanické vlastnosti. Tyto predikce mohou sloužit například k určení nebezpečných míst součásti nebo k simulaci řízené deformace v případě nárazových deformačních zón [22]. Mechanické vlastnosti závisí zejména na velikosti buňky struktury, jejím uspořádání, tvaru jednotlivých prutů a kvalitě vyrobených povrchů. [7].

Autoři článků [6,7,8] popsali nejčastěji se vyskytující topologie buněk strukturovaného materiálu vyrobeného metodou SLM a zabývali se výzkumem jejich mechanických vlastností. Jako zkušební vzorky byla nejčastěji volena **krychlová testovací tělesa s buňkami typu BCC a BCCZ**.

Tancogne-Dejean et al.(2016) [6] se zabývali studiem účinků statického i dynamického namáhání na strukturovaný materiál při různých velikostech a průměrech prutů i jejich tvaru v rámci topologie oktaedrické BCC buňky. Jedním z kritérií pro porovnání různých typů strukturovaného materiálu byla **měrná absorbovaná energie**.

Tuto studii další autoři [7] rozšířili o testování mechanických vlastností strukturovaného materiálu při statickém zatěžování s topologií mřížek BCC, BCCZ a F2BCC. Při tlakových zkouškách byly zaznamenány srovnatelné průběhy křivek zatěžování jako v článku [6]. Topologií s nejlepšími mechanickými vlastnostmi byla vyhodnocena struktura s BCCZ mřížkou, zatímco nejhorších výsledků dosáhla struktura BCC. Dále byl potvrzen velký vliv členitého povrchu prutů vyplývající z principu výrobní metody na chování struktury při zatěžování ve smyku v porovnání s kompresními testy. Z toho plyne neopakovatelnost výsledků smykových zkoušek. Zajímavým poznatkem bylo i rozdílné chování BCC buněk při různých okrajových podmínkách. Naopak topologie BCCZ byla těmito podmínkami ovlivněna jen minimálně. Závěrem je pak potvrzení vlivu relativní hustoty, velikosti buňky a topologie na mechanické vlastnosti.

Tyto poznatky byly získány na základě výsledků tahových a tlakových zkoušek. **Závislosti síla - deformace ( $F - x$ ) a napětí-poměrné délkové prodloužení ( $\sigma - \epsilon$ )** získané z těchto testů a hodnoty **meze pevnosti v tahu ( $R_m$ )**, **smluvní meze kluzu ( $R_{p0,2}$ )** a **modulu pružnosti ( $E$ )** jsou dalšími kritérii využitými pro srovnání mikroprutových struktur v této práci.

Mager et al.(2013)[8] navázali na [6,7] zkoumáním strukturovaného materiálu metodou tříbodového ohybového testu, který prokázal značný vliv velikosti buňky (tedy vysoké porozity vzorku) na míru deformace a velikost napětí. **Vyšší porozita má za následek vyšší pružnost struktury**, a tedy mnohem větší míru deformace vzorku v ohybu.

Autoři článku [9] zkoumali deformaci testovacího tělesa sendvičového typu s jádrem tvořeným strukturou složenou z periodicky se opakujících buněk typu BCC umístěným mezi panely s matricí z epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými

vlákny. Experimentální data jsou pak porovnávána s numerickými modely využívajícími matematickou interpretaci materiálu. Tento článek ukazuje jedno z **využití dat získaných z materiálových testů**.

Na základě poznatků získaných z rešeršní části byl sestaven skript v programu MS Excel pro automatické zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností prutových těles i mikroprutových struktur. Díky tomuto skriptu je možné rychle vyhodnotit velké množství vzorků, což je jinak velmi komplikované a časově náročné. Skript dále obsahuje výpočet všech běžně používaných kritérií pro porovnání mechanických vlastností testovaných těles. Výsledky je potom možné snadno porovnávat s dalšími studiemi.

### **3.1 Cíle bakalářské práce**

Cílem bakalářské práce je nalezení materiálových konstant strukturovaného materiálu tvořeného základními prutovými i prostorovými buňkami.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše v oblasti mechanických vlastností strukturovaného materiálu
- nalezení vhodných kritérií pro porovnání mikroprutových struktur vyrobených metodou SLM z materiálu AlSi10Mg,
- vyhodnocení již provedených experimentů a stanovení závěrů,
- vytvoření skriptu v programu Excel pro vyhodnocování mechanických testů strukturovaného materiálu.



## 4. MATERIÁL A METODY

---

**4**

### 4.1 Materiál

---

4.1

Díky dobré dostupnosti byl v této práci pro výrobu testovacích těles použit materiál  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ . Z tohoto materiálu je možné vyrábět jak plné součásti, tak topologicky optimalizované díly využívající mikroprutových struktur. Tyto slitiny jsou dále dobře tepelně zpracovatelné, takže mechanické vlastnosti dílů pro reálné aplikace mohou být přizpůsobeny konkrétním požadavkům. [19]

### 4.2 Zařízení SLM 280<sup>HL</sup>

---

4.2

**Obr. 4.1** Zařízení SLM 280<sup>HL</sup> firmy SLM Solutions [14]

Zařízení SLM 280<sup>HL</sup> (viz obr. 4.1) je výrobní zařízení pro výrobu kovových objektů pomocí technologie SLM. Zařízení je umožňuje vyrábět ze široké škály materiálů (nerezové oceli, titanové slitiny, hliníkové slitiny atd.). V zařízení je možné pracovat i s velmi reaktivními materiály díky inertní atmosféře tvořené dusíkem nebo argonem. Stavební prostor stroje má velikost  $280 \times 280 \times 350 \text{ mm}^3$ . Jako tepelné zdroje jsou použity dva YLR-Lasery s výkonem 400 W, které jsou skenují povrch materiálu rychlostí 10 m/s. SLM 280<sup>HL</sup> je schopno vyrábět rychlostí  $20 \text{ cm}^3/\text{h}$ . [5,14]

### 4.3 Materiálové testování

O vhodnosti daného materiálu a struktury při praktickém využití rozhodují mechanické vlastnosti. Jejich klasifikace se provádí pomocí řady kvantitativních a kvalitativních kritérií. Tyto experimentálně stanovené hodnoty se obecně označují jako **materiálové konstanty**.

Tato práce se zabývá vyhodnocením experimentálních tlakových a tahových testů strukturovaného a plného materiálu, provedených v práci [5].

#### Aparatura pro materiálové testování Zwick Z020

Testovací tělesa byla testována na zařízení Zwick W020 (Viz Obr. 4.2). Na zařízení byly provedeny tlakové a tahové testy. Zařízení je schopno vyvinout zatěžovací sílu 20 kN [5,16].



Obr. 4.2 Aparatura pro materiálové testování Zwick Z020 [16]

## 4.4 Vyhodnocení testů

4.4

---

### 4.4.1 Tahová zkouška mikroprutových těles

4.4.1

---

#### Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku byly použity dva typy prutových těles o celkové délce  $l_0 = 50$  mm. **Typ 1** byl vyroben s pruty o průměru  $d_1 = 0,45$  mm a počtem prutů  $n_1 = 60$ . **Typ 2** byl vyroben s pruty o průměru  $d_2 = 1$  mm a počtem prutů  $n_2 = 12$ . V článku [17] autoři získali hodnotu meze pevnosti  $R_m$  pro použitý materiál  $AlSi_{10}Mg$  přibližně 390 MPa.



Obr. 4.3 Zkušební prutová tělesa pro tahové testy na pracovní platformě SLM 280 HL [5]

Oba typy vzorků byly vyrobeny pod úhlem stavby 45 a 90 stupňů vzhledem ke spodní rovině stavební komory (viz obr. 4.3). Celkem tedy byly vyrobeny 4 sady vzorků, z nichž každá obsahovala pět těles. [5]

### Vyhodnocení tahových testů prutových těles

V průběhu zkoušek pomocí testovacího zařízení Zwick Z020 byl zaznamenáván posuv v závislosti na zatěžující síle  $F$ . Na základě získaných dat byly vyhodnocovány následující parametry:

#### Smluvní napětí v tahu:

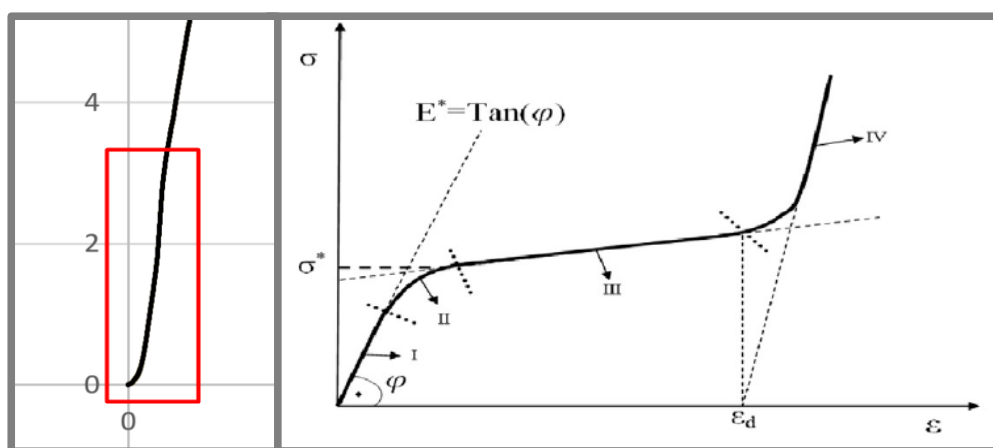
$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F \cdot n \cdot d^2}{4\pi} \quad (4-1)$$

#### Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4-2)$$

kde  $l$  je vzdálenost hrotů měřícího přístroje pro měření poměrného prodloužení. Tato vzdálenost byla pro všechny tahové zkoušky konstantní a to 30 mm.  $\Delta l$  pak dále označuje prodloužení tělesa v pozorované oblasti.

**Youngův modul (modul pružnosti v tahu)** byl získán podle článku [7] a na základě Hookova zákona jako směrnice lineární oblasti závislosti napětí - poměrné prodloužení (viz obr. 4.4(vpravo)). Lineární oblast je ovlivněná výrobními nepřesnostmi, a proto je u každého vzorku individuální (viz obr. 4.4 (vlevo)). Při použití vypracovaného skriptu vyžaduje výpočet kontrolu rozsahu hodnot pro určení směrnice přímky lineární oblasti (viz obr. 4.5). Obdobným způsobem je v rámci skriptu určen i **tečný modul  $E_t$** , který popisuje oblast materiálu za mezí kluzu spolu s modulem pružnosti v tahu slouží ke konstrukci **bilineárního pracovního diagramu**. Tento diagram je nejjednodušším nelineárním popisem v rámci materiálového modelu pro účely matematických řešičů.

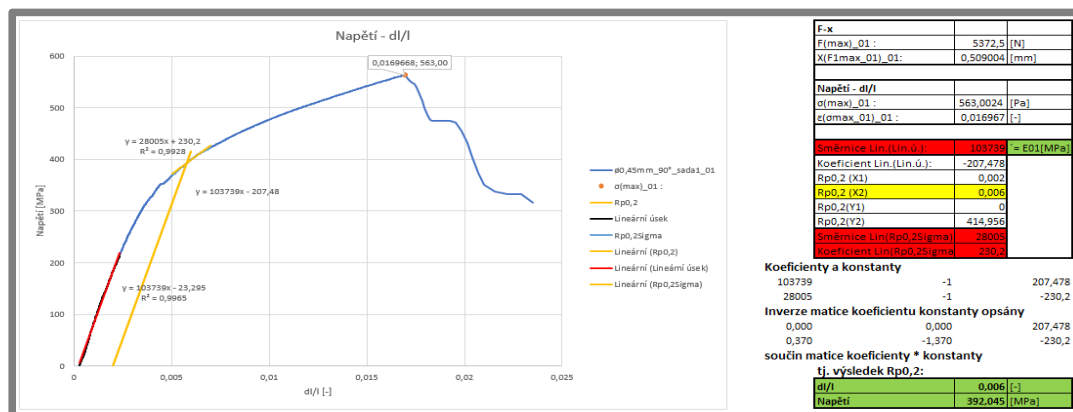


Obr. 4.4 Část pracovní přímky před lineární oblastí (vlevo), znázornění vyhodnocení modulu pružnosti  $E$  ze závislosti napětí - poměrné prodloužení (vpravo) [7]

Smluvní mez kluzu je nejmenší napětí, které způsobí rozvoj výrazných plastických deformací u materiálů s nevýraznou mezí kluzu. **Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$**  je napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti 0,2 % z  $l_0$ .

Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  lze získat graficky z experimentálně získaných dat vedením rovnoběžné přímky s přímkou lineární oblasti, procházející bodem znázorňující hodnotu 0,2 poměrného prodloužení. Průnik této přímky s křivkou zatěžování vyznačuje hodnotu smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ .

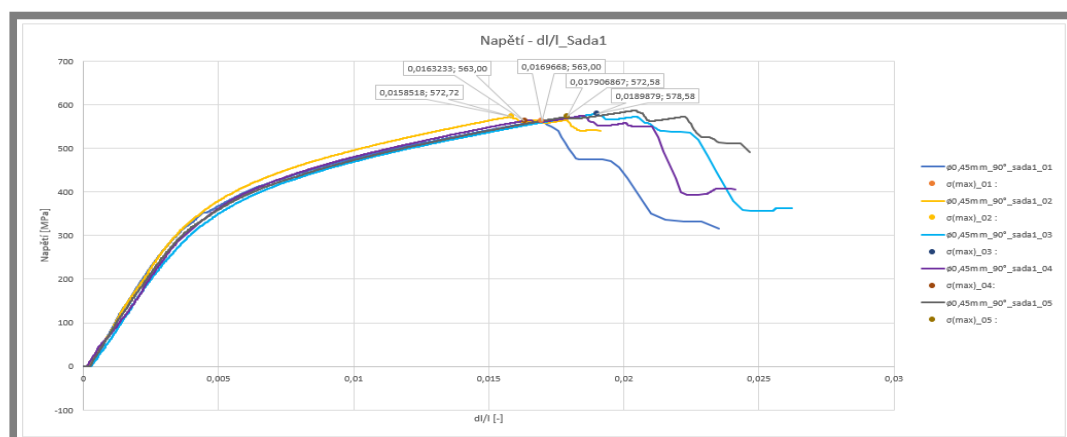
V případě použití skriptu (viz obr. 4.5) je nutné manuálně přepsat směrnici lineární oblasti. Následně je nutné aproximovat rozsah dat předpokládaného průniku přímky s křivkou zatěžování. Pomocí lineární spojnice trendu (Lineární ( $R_{p0,2}$ Sigma)), směrnici a koeficient je opět nutno manuálně přepsat je pomocí matic nalezen průsečík  $R_{p0,2}$ .



Obr. 4.5 Ukázka výpočtu  $R_{p0,2}$  pomocí vytvořeného skriptu

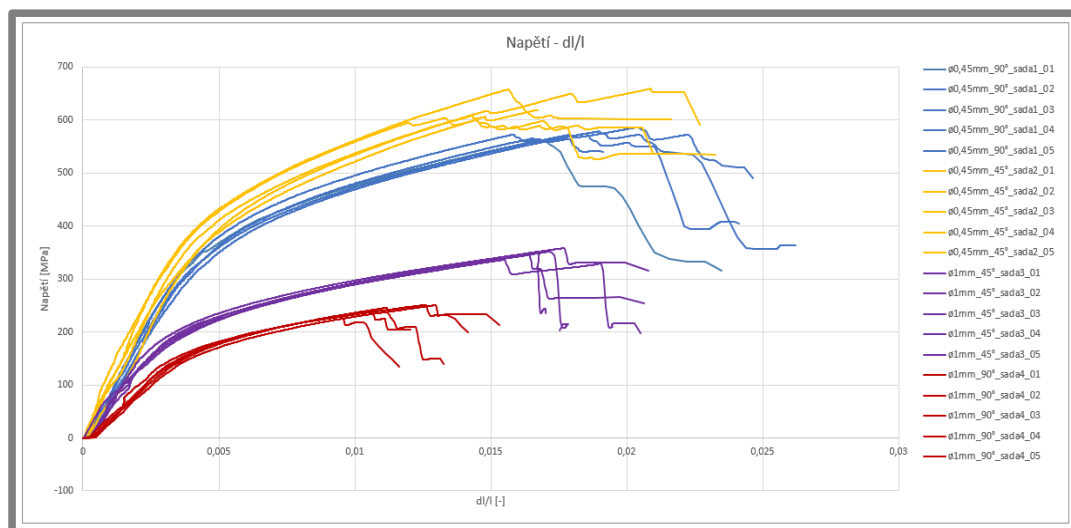
Vytvořený skript z dostupných dat automaticky označí v případě závislosti F-x nejvyšší dosaženou hodnotu zatěžovací síly **F(max)** která předchází porušení vzorku a deformaci v tomto bodě **x(max)**. Analogicky je pak označena i hodnota nejvyššího dosaženého napětí při porušení **σ(max)**, označovaná jako **Mez pevnosti v tahu  $R_m$**  a náležitě **poměrné prodloužení  $ε(max)$**  (viz obr. 4.5). Tento postup je opakován pro všechny sady vzorků.

Následně je na další list vygenerováno grafické vzájemné porovnání závislosti F - x a  $σ - ε$  v rámci jedné sady spolu s maximálními dosaženými hodnotami sledovaných veličin (viz obr. 4.6).



Obr. 4.6 Porovnání výsledků závislosti  $σ-ε$  s vyznačenými maximálními hodnotami sledovaných veličin v rámci jedné sady

Souhrnné grafické srovnání všech tahových zkoušek pro obě závislosti je poté zobrazeno do grafu na následující list (viz obr. 4.7).



Obr. 4.7 Souhrnné zobrazení závislosti  $\sigma$ - $\epsilon$

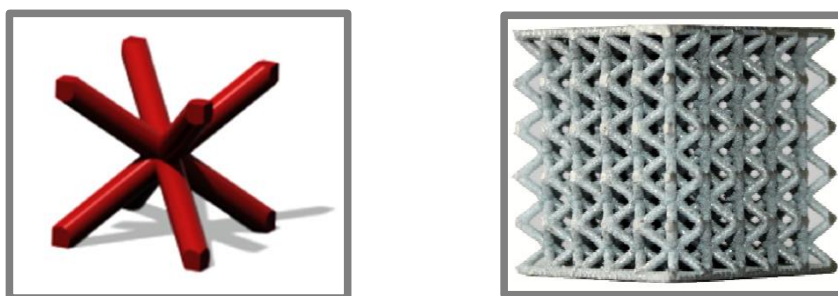
Na posledním listu skriptu jsou pak veškeré získané hodnoty statisticky vyhodnoceny a porovnány. Pro kvalitní statistickou analýzu je potřeba vyhodnotit nejméně 10 vzorků. Toto nebylo při vyhodnocování testovaných vzorků v této práci z ekonomických a časových důvodů možné.

#### 4.4.2

#### 4.4.2 Tlaková zkouška mikroprutových struktur

##### Zkušební tělesa pro tlakovou zkoušku

Byly testovány 2 typy vzorků tvořených mikroprutovou strukturou topologie BCC. Tato struktura je tvořena osmi pruty sestavenými do tvaru tělesových úhlopříček krychle (viz obr. 4.8 vlevo).



Obr. 4.8 Základní buňka typu BCC (vlevo), testovací vzorek BCC20 4 0,5

První typ (**Typ A**) vzorků byl vyroben o rozměrech 20x20x20 mm s nominálním průměrem prutů 0,5 mm a velikostí buňky 4 mm (viz obr. 4.8 vpravo). Druhým typem (**Typ B**) pak byla opět struktura s topologií BCC o rozměrech 30x30x30 mm, nominálním průměru prutů 1 mm a velikostí buňky 6 mm.

Celkem byly vyrobeny 2 sady vzorků po 5 kusech. Po vyrobení pomocí zařízení SLM 280 HL nebyly vzorky nijak tepelně ani povrchově upravovány. K provedení byla použita aparatura Zwick Z020.

### Vyhodnocení tlakových testů prutových těles

Základní charakteristickou veličinou mikroprutových struktur je **relativní hustota**. Pro výpočet Relativní hustoty je nejprve nutné získat hustotu vzorku. Podobně jako rovnice (2-1) a (2-2) byl dle článku [20] odvozen vztah pro výpočet relativní hustoty BCC struktury:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \sqrt{3} * \pi * (d/a)^2 \quad (4-3)$$

kde  $\rho^*$  značí hustotu vzorku. Pro hustotu plného materiálu AlSi10Mg  $\rho_s = 2680 \text{ kg/m}^3$  [21] byla dle vztahu (4-3) vypočtena relativní hustota obou testovaných vzorků:

$$\bar{\rho}_1 = \sqrt{3} * \pi * \left(\frac{0,0005}{0,02}\right)^2 = 0,085021845$$

$$\bar{\rho}_2 = \sqrt{3} * \pi * \left(\frac{0,001}{0,03}\right)^2 = 0,151149947$$

Během tlakových zkoušek byl obdobně jako v případě tahových testů zaznamenáván posuv (deformace) v závislosti na zatěžující síle  $F$ . Pomocí získaných dat byly následně vyhodnocovány tyto parametry:

#### Smluvní napětí v tlaku:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (4-4)$$

kde  $F$  značí zatěžující sílu a  $S$  uvažovanou zatěžovanou plochu. Protože v analyzovaných studiích nebyly uvažované plochy definovány, byly vyhodnocovány tři případy:

$$\text{- Zatěžovaná plocha } S_b = a * a \quad (4-5)$$

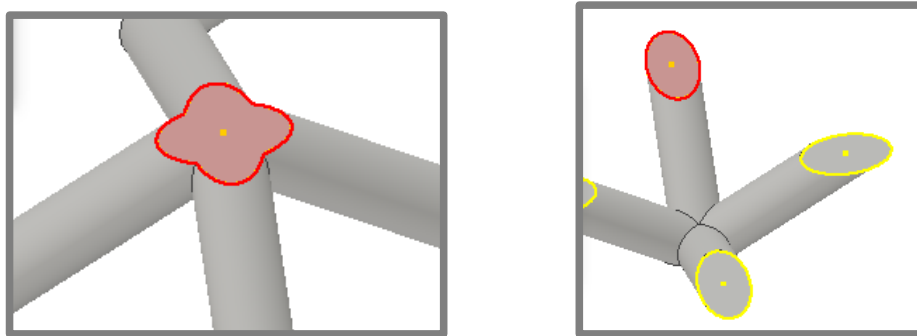
kde  $a$  značí délku hrany vzorku. Jedná se tedy o celkový obsah základny vzorku.

$$\text{- Zatěžovaná plocha } S_{min} = 25 * S_j, \quad (4-6)$$

kde  $S_j$  průřez místa průniku prutů uprostřed základní buňky (viz obr. 4.9 vlevo).  $S_{min}$  pak značí celkovou plochu průřezu v rovině vedoucí středem řady buněk.

$$\text{- Zatěžovaná plocha } S_{max} = 100 * S_e, \quad (4-7)$$

kde  $S_e$  značí plochu průřezu konce jednoho prutu (viz obr 4.9 vpravo).  $S_{max}$  tedy značí celkový průřez vzorku v rovině ležící mezi dvěma řadami buněk.

Obr. 4.9 Plocha průřezu  $S_j$  (vlevo) a  $S_e$  (vpravo)

Obsahy ploch pro typ BCC20\_4\_0,5 (označené indexem 1)  $S_{j1} = 0,453 \text{ mm}^2$ ,  $S_{e1} = 0,34 \text{ mm}^2$  a pro typ BCC30\_6\_1 (označené indexem 2)  $S_{j2} = 1,814 \text{ mm}^2$ ,  $S_{e2} = 1,36 \text{ mm}^2$  byly získány na základě CAD modelu vytvořeného v programu Autodesk Inventor. Obsahy zátěžných ploch pro testované struktury dle rovnic (4-5), (4-6) a (4-7) jsou v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Obsahy zátěžných ploch

	BCC20_4_0,5	BCC30_6_1
$S_b [\text{mm}^2]$	400	900
$S_{\min} [\text{mm}^2]$	11,325	45,35
$S_{\max} [\text{mm}^2]$	34	136

Poměrné prodloužení  $\epsilon$  bylo určováno dle vztahu:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{a} \quad (4-8)$$

**Modul pružnosti struktury** byl stanoven analogicky s tahovými testy jako směrnice lineární oblasti závislosti napětí-poměrné prodloužení (viz obr. 4.4). Lineární oblast je opět u jednotlivých vzorků rozdílná a vyžaduje při použití skriptu kontrolu rozsahu hodnot pro určení směrnice přímky lineární oblasti (viz obr. 4.10).

Obdobně jako v případě skriptu pro tahovou zkoušku je z dostupných dat automaticky označena nejvyšší dosažená hodnota zatěžovací síly **F(max)**, která předchází prvního porušení struktury a deformaci v tomto bodě **x(max)**. Analogicky je pak označena i hodnota nejvyššího dosaženého napětí při zhroucení první řady buněk  **$\sigma(\text{max})$** , označovaná jako **Mez pevnosti struktury v tlaku  $R_m$**  a náležitá **poměrná deformace  $\epsilon(\text{max})$**  (viz obr. 4.10) všech vzorků obou sad. Následující listy pak opět obsahují grafická srovnání jednotlivých testů v rámci jedné sady a vzájemné porovnání obou sad.

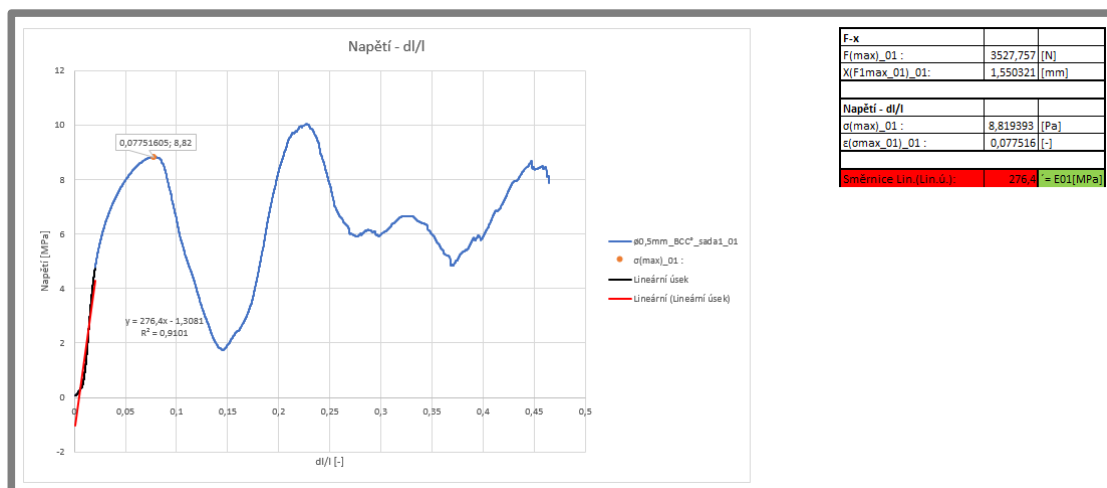
Z příkladů reálného použití mikroprutových struktur k tlumení rázů se zde nabízí analogie s mechanickou pružinou. Veličinou charakterizující tuto analogii je **Tuhost struktury  $k$** .



Ta byla v rámci skriptu stanovena z rovnice (4-9):

$$F = k * x \quad (4-9)$$

kde  $F$  značí momentální sílu působící na strukturu a  $x$  momentální deformaci ve směru zatěžování.



Obr. 4.10 Určení modulu pružnosti struktury pomocí skriptu

Zvláštní list je pak věnován výpočtu **měrné absorbované energie** vycházející z rovnice (2-3). Tato rovnice byla kvůli rozdílné velikosti vzorků upravena dle článku [22] do tvaru:

$$\psi = \frac{w}{\rho * V} \quad (4-10)$$

Na základě článku [6] byl odvozen výpočet **relativní měrné absorbované energie**, která je k porovnání s relativní hustotou příhodnější. Tato se vypočítá dle vzorce:

$$\psi_{REL} = \frac{\psi}{\psi_s} \quad (4-11)$$

kde  $\psi$  značí měrnou absorbovanou energii struktury a  $\psi_s$  SAE základního materiálu. Ta je vypočtena pomocí skriptu jako aritmetický průměr hodnot získaných po dosazení pro každý vzorek sady do vztahu:

$$\psi_s = \frac{\psi}{\rho} \quad (4-12)$$

Poslední list opět obsahuje shrnutí získaných hodnot. Na základě získaných výsledků pak budou obě struktury porovnány.

## 5. VÝSLEDKY

Za pomoci vytvořeného skriptu byly vyhodnoceny materiálové charakteristiky prutových těles a mikroprutových struktur z materiálu AlSi10Mg vyrobených metodou SLM. Získané hodnoty byly následně zpracovány a porovnány.

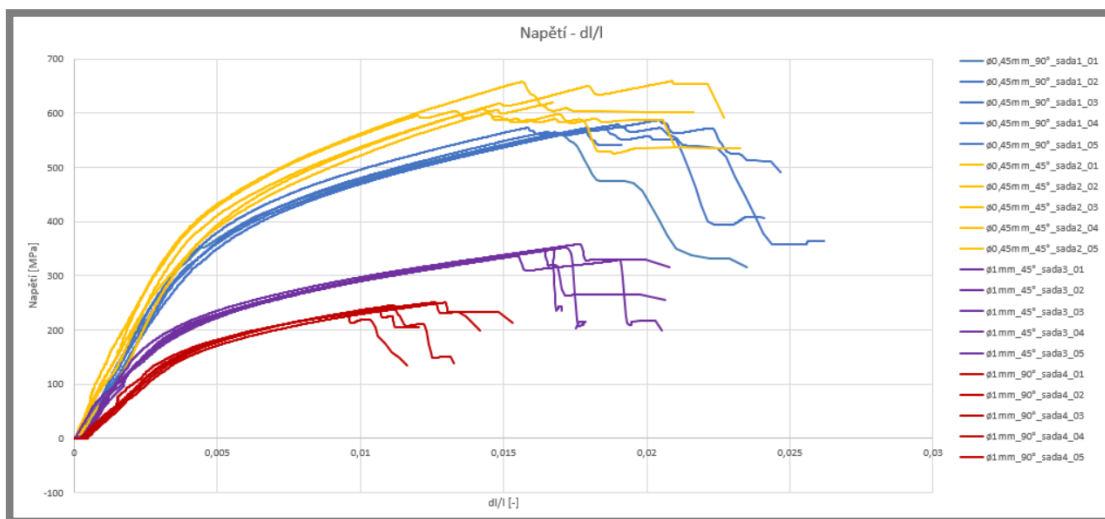
### 5.1

### 5.1 Výsledky tahové zkoušky

#### 5.1.1

#### 5.1.1 Mez pevnosti v tahu

První materiálovou konstantou získanou z tlakové zkoušky byla hodnota meze pevnosti v tahu  $R_m$  (viz rovnice 4-4). K rychlému vyhodnocení výsledků zkoušky v rámci skriptu slouží grafická znázornění. Například z grafu 5.1 je zřejmé, že na velikost meze pevnosti má zásadní směr stavby vzorku. Sady vyráběné pod úhlem  $45^\circ$  vykazovaly globálně vyšší hodnoty napětí než vzorky vyráběné pod úhlem  $90^\circ$ . Naopak rozdělení křivek v závislosti na geometrii je v rozporu s očekávanými výsledky. Tato anomálie byla podnětem práce [5], která se zabývala rozměrovou analýzou. Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 5.1.



Obr. 5.1 Srovnání tahových křivek testovaných vzorků

Tab 5.1 Naměřené hodnoty  $R_m$

Rm [MPa]				
	sada_1	Sada_2	Sada_3	Sada_4
vzorek č.	ø0,45mm_90°	ø0,45mm_45°	ø1mm_45°	ø1mm_90°
1	563,00	600,17	350,50	250,53
2	572,72	657,58	351,32	250,49
3	578,58	608,58	345,24	245,39
4	563,00	593,35	357,91	230,09
5	572,58	617,42	335,50	240,99
AVG:	569,97	615,42	348,10	243,50

## 5.1.2 Smluvní mez kluzu

5.1.2

Hodnoty smluvní meze kluzu odpovídaly náležitým hodnotám meze pevnosti a nevykazovaly žádné výrazné odchylky. Shrnutí číselných výsledků je v tabulce 5.2.

Tab. 5.2 Shrnutí výsledků  $R_{p0,2}$ 

Rp0,2 [MPa]				
	sada_1	Sada_2	Sada_3	Sada_4
vzorek č.	ø0,45mm_90°	ø0,45mm_45°	ø1mm_45°	ø1mm_90°
1	392,05	394,25	236,89	183,94
2	424,48	449,48	234,41	192,89
3	396,91	482,69	234,46	195,13
4	431,41	470,12	228,89	188,97
5	399,46	466,77	232,54	197,30
AVG:	<b>408,86</b>	<b>452,66</b>	<b>233,44</b>	<b>191,65</b>

## 5.1.3 Modul pružnosti

5.1.3

Modul pružnosti E odpovídá směrnici lineární části tahového diagramu. Tento úsek odpovídá pružné deformaci a vyjadřuje závislost napětí na deformaci dle Hookova zákona. Získané hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 5.3.

Tab 5.3 shrnutí hodnot modulu pružnosti E

E [MPa]				
	sada_1	Sada_2	Sada_3	Sada_4
vzorek č.	ø0,45mm_90°	ø0,45mm_45°	ø1mm_45°	ø1mm_90°
1	103739	124886	67625	58060
2	95847	127654	64277	42736
3	89727	88558	68909	47433
4	80566	109792	85639	51837
5	93491	91480	65985	45323
AVG:	<b>92674</b>	<b>108474</b>	<b>70487</b>	<b>49077,8</b>

Nejvyšších hodnot, podobně jako u meze pevnosti, dosahovaly vzorky **typu 1** s úhlem stavby 45°. Toto chování je však opět rozporu s očekávanými výsledky, protože modul není závislý na průřezu prutu ani na geometrii tělesa. Bylo zde také zaznaménáno nejvyšší procentuální variační rozpětí, které průměrně dosahuje hodnoty  $R = 30,644\%$ .

## 5.2

## 5.2 Výsledky tlakové zkoušky

## 5.2.1

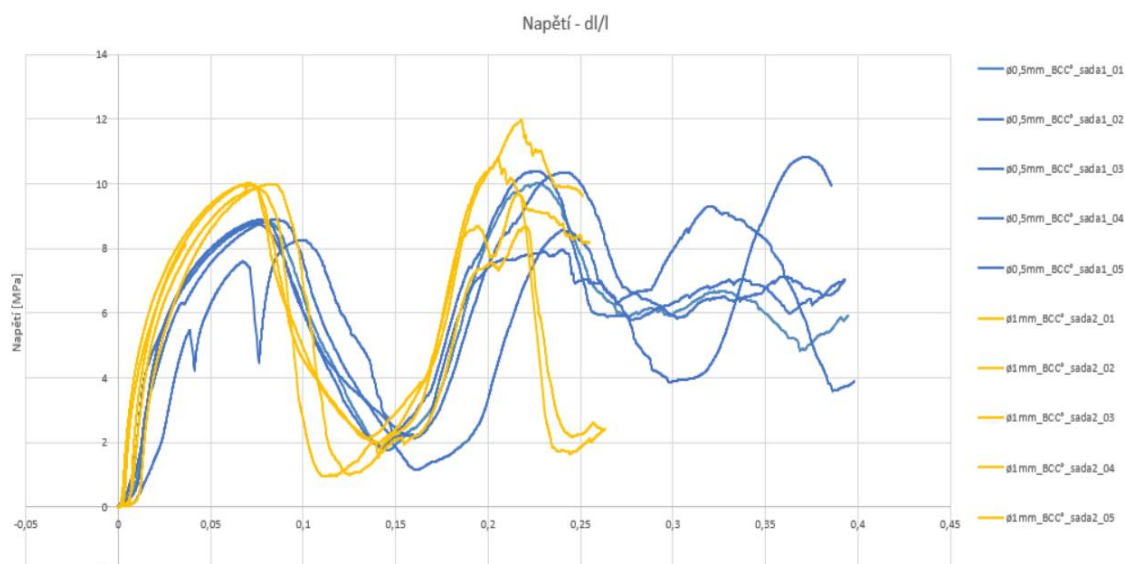
## 5.2.1 Mez pevnosti v tlaku

Protože v analyzovaných zdrojích nebyl průřez pro výpočet napětí specifikován, mez pevnosti v tlaku byla vypočtena pro tři typy průřezů strukturou (viz tab. 4.1.), aby bylo možné identifikovat vhodné hodnoty porovnáním výsledků s analyzovanými studiemi. Tabulka 5.4 obsahuje aritmetické průměry dosažených hodnot meze pevnosti tlaku (viz rovnice (4-4)). Jeden ze vzorků **typu A** vykazoval nestandartní průběh zátěžových křivek (viz obr. 5.2), a proto nebyl ve výpočtu uvažován.

Tab 5.4 Aritmetické průměry hodnot meze

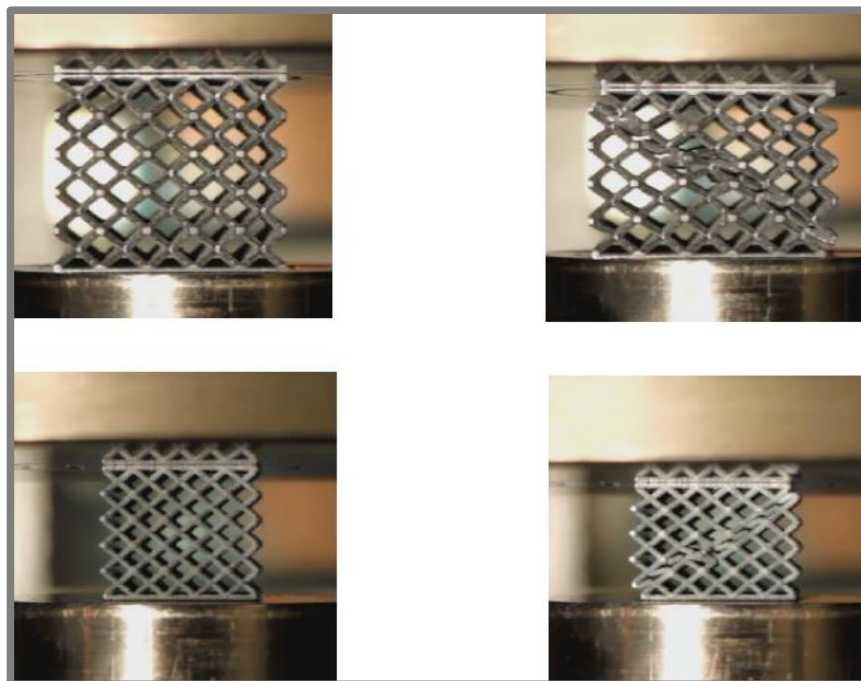
Rm [MPa]		
	BCC20_4_0,5	BCC30_6_1
$S_b$ [mm <sup>2</sup> ]	8,84	9,94
$S_{max}$ [mm <sup>2</sup> ]	104	65,81
$S_{min}$ [mm <sup>2</sup> ]	312,22	197,35

V případě plochy  $S_b$  dosahují vzorky **typu B** vyšších hodnot než vzorky **typu A**. V případě ploch  $S_{max}$  a  $S_{min}$  je průměrná hodnota meze pevnosti vzorku **typu B** zhruba o třetinu menší. Toto je způsobeno tím, že v prvním případě není zohledněna geometrie vnitřního uspořádání struktury, která má velký vliv na rozložení zatížení. Způsob výpočtu uvažující nejmenší průřez ( $S_{min}$ ) je shodný s postupem výpočtu při tahovém testu, a proto jsou jejich výsledky vhodné k vzájemnému porovnání.



Obr. 5.2 Záznam tahových zkoušek pro plochu  $S_b$ . Nestandartní průběh vzorku typu A číslo 3 je zde jasně viditelný

Reálná deformace vzorků byla v obou případech soustředěna v diagonále vzorku kvůli nejvyšší koncentraci ohybového a smykového napětí. (viz obr. 5.3)



**Obr. 5.3** Tlaková zkouška mikroprutových struktur  $\phi$  1 mm (nahore) a  $\phi$  0,5 mm (dole) [5]

### 5.2.2 Modul pružnosti struktury

5.2.2

Modul pružnosti struktury je materiálovou konstantou, a tedy není závislý na typu uvažované zatěžovací plochy ani geometrii. Proto se jeho hodnoty v jednotlivých případech nemění. U obou typů vzorků byly zaznamenány srovnatelné průměrné hodnoty (viz tab. 5.5).

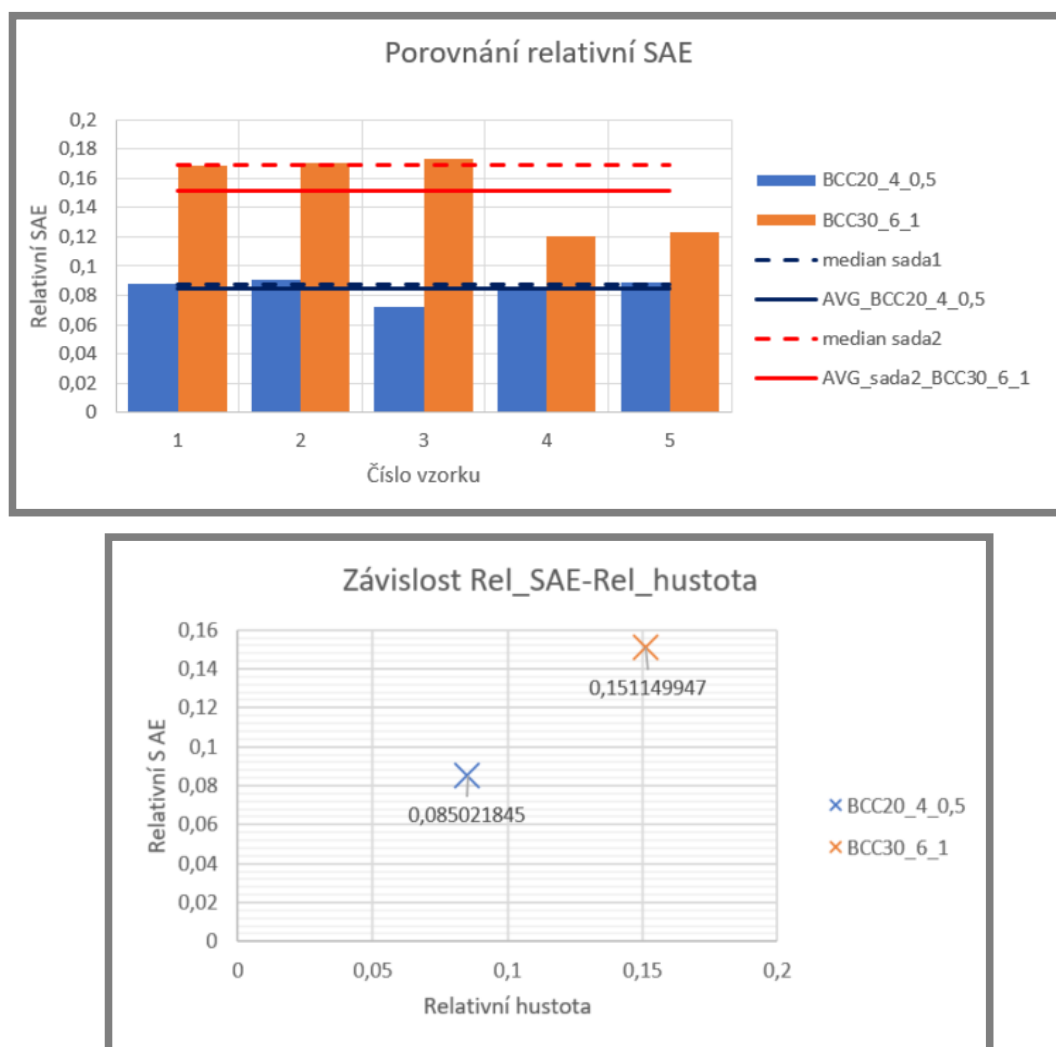
**Tab. 5.5** Získané hodnoty modulu pružnosti struktur

E [MPa]		
	sada_1	Sada_2
vzorek č.	$\phi 0,6\text{mm\_BCC}^\circ$	$\phi 1\text{mm\_BCC}^\circ$
1	328,62	285,37
2	229,5	301,43
3		335,2
4	299,03	249,85
5	336,11	324,02
AVG:	298,315	299,174

## 5.2.3

## 5.2.3 Měrná absorbovaná energie (SAE)

Hodnoty měrné absorbované energie nejsou závislé na typu zatěžovací plochy, a proto jsou dalším důležitým porovnávacím kritériem strukturovaného materiálu. Zároveň je to vzhledem k aplikacím mikroprutových struktur v oblasti deformačních zón a tlumení rázů velmi důležitá charakteristika. Je definována jako schopnost absorpce energie (práce) spotřebované k deformaci na jednotku váhy materiálu při jednoosém tlakovém zatížení. V praxi se častěji používá **Relativní SAE**, která je vztažena k měrné absorbované energii materiálu. Tato pak poskytuje lepší srovnání ve vztahu k relativní hustotě, která je jednou ze základních charakteristik strukturovaného materiálu. Získané hodnoty Relativní SAE (viz vztahy (4-10), (4-11) a (4-12)) z jednotlivých vzorků byly následně porovnány a zpracovány (viz obr. 5.4 nahoře). Z vypočítaných průměrných hodnot byla sestavena závislost relativní SAE-Relativní hustota. Tato závislost odpovídá předpokládanému vývoji, kdy je relativní měrná absorbovaná energie přímo úměrná relativní hustotě struktury (viz obr. 5.4 dole)



Obr. 5.4 Vypočtené hodnoty relativní SAE jednotlivých vzorku (nahoře) a závislost Relativní SAE – Relativní hustota (dole)

## 6. DISKUZE

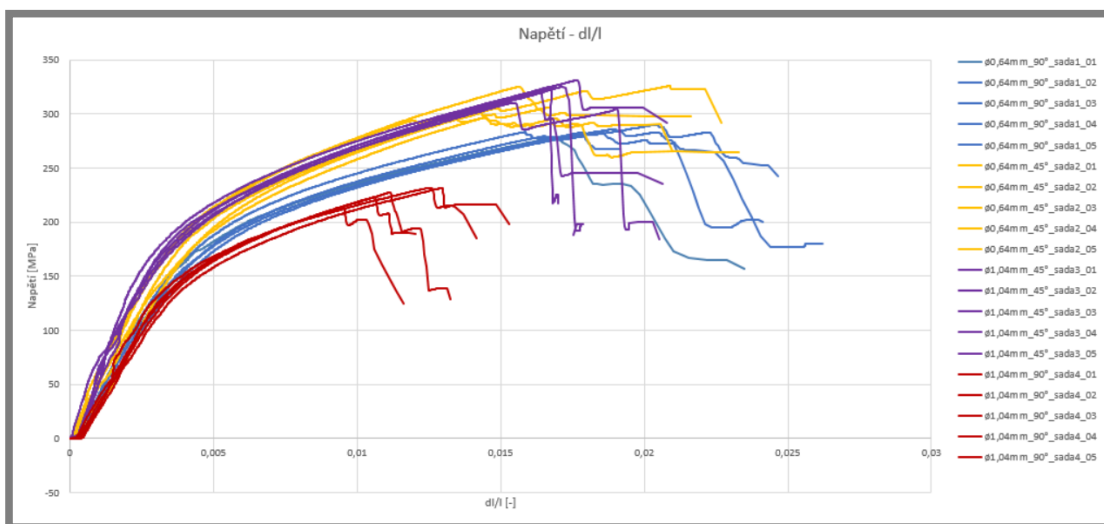
6

Aditivní výrobní technologie jsou nekonvenční technologií umožňující efektivní výrobu součástí využívajících mikroprutových struktur. Takto topologicky optimalizované díly umožňují efektivnější využití materiálu a snížení hmotnosti ve srovnání plnými součástmi při zachování obdobných mechanických vlastností (viz obr. 0.2). Toto je vhodné zejména pro letecký, kosmický a automobilový průmysl, kde je snaha o redukci hmotnosti použitých dílů. Aby bylo možné používat topologicky optimalizované díly ve zmíněných oblastech, je vyžadována schopnost popsat a predikovat jejich vlastnosti. K tomu je nezbytné zjistit a porovnat několik materiálových konstant, které závisí zejména na geometrii buňky a kvalitě vyrobených povrchů. [7,19]. Na základě těchto poznatků byl z dat získaných z tahových a tlakových zkoušek v práci [5] sestaven skript v programu MS Excel.

Skript je schopen rychle a snadno vyhodnotit požadované konstanty velkého množství vzorků. Vyhodnocená data jsou následně přehledně vizuálně zpracována do grafů od pracovních křivek jednotlivých vzorků po porovnání křivek v rámci sady a celkového vyhodnocení všech měření. Součástí skriptu je i shrnutí a porovnání všech klíčových veličin včetně jednoduchého statistického zpracování.

Při vyhodnocení tahových testů pomocí tohoto skriptu s ideálními rozměry navržených těles došlo k rozdělení pracovních křivek vzorků typu 1 a 2 na základě jejich geometrického uspořádání (viz. obr. 5.1). Také hodnoty meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti a smluvní meze kluzu neodpovídaly předpokládaným hodnotám.

Předmětem práce [5] byla mimo jiné i rozměrová analýza vyrobených vzorků. Na základě této analýzy bylo zjištěno, že reálné průměry prutů vyrobené metodou SLM jsou v případě vzorku typu 1 přibližně o 0,2 mm větší. Hodnoty průměrů vzorku typu 2 byly větší jen nepatrně. Jednoduchým dosazením korigovaných průřezů do vypracovaného skriptu je díky grafické reprezentaci dat zřetelné vyrovnání křivek. Díky skriptu je tak snadno možné zjistit požadované charakteristiky a ty dále porovnat s jinými studiemi (viz obr. 6.1).



Obr. 6.1 Tahové křivky testovacích vzorků po zavedení reálných parametrů.



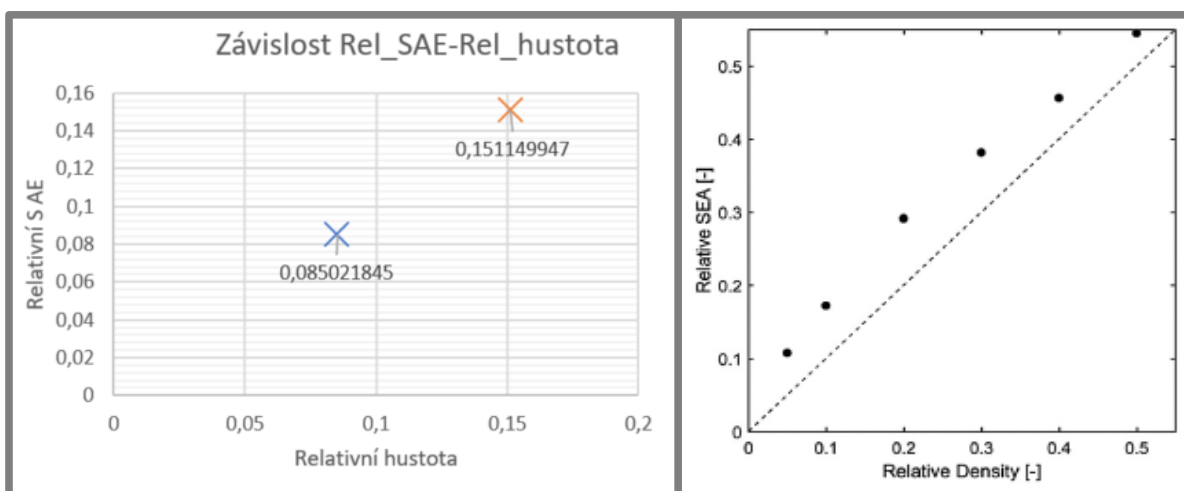
Obecně vyšších hodnot ve všech oblastech než vzorky vyráběné pod úhlem  $90^\circ$  dosahovaly vzorky orientované při výrobě pod úhlem  $45^\circ$  k základní rovině.

Toto chování je pravděpodobně způsobeno tím, že při zatížení jsou při orientaci tělesa pod úhlem  $45^\circ$  jednotlivé eliptické vrstvy materiálu ve směru zatěžující síly díky své orientaci navzájem provázány větší plochou a jsou tedy schopny před kolapsem odolat vyššímu zatížení. U vzorků s úhlem stavby  $90^\circ$  jsou při výrobě vrstvy tvaru kruhu nanášeny na sebe. Tento fakt má za následek menší styčnou plochu, a tedy menší vzájemnou soudržnost ve směru zatěžování, který je navíc kolmý ke styčným plochám jednotlivých kruhových segmentů. Vrstvy jsou tedy snáze oddělitelné, a proto jsou tyto vzorky schopny přenášet menší zatížení.

V případě tlakových testů strukturovaného materiálu závisí hodnota meze pevnosti  $R_m$  na uvažovaném průřezu. Ačkoliv v člancích [7,8,23] nebyl specifikován průřez použitý k výpočtu, nejlepší shody bylo dosaženo při výpočtu pracujícím s půdorysnou plochou vzorku  $S_b$ . Výsledné hodnoty byly ovšem stále vyšší a neodpovídaly očekávaným hodnotám získaným základě zmíněných studií. Toto bylo pravděpodobně opět způsobeno zanedbáním odchylek průměrů reálných prutů od uvažovaných ideálních velikostí. Řešením by bylo provedení rozměrové analýzy. Pak by bylo možné do vypracovaného skriptu vložit reálná vstupní data a s jeho pomocí obdržet reálné hodnoty.

Na základě článků [5,6,8,20] byla jako nejvýhodnější porovnávací kritéria mikroprutových struktur vyhodnoceny modul pružnosti v tlaku, relativní hustota struktury, a měrná absorbovaná energie. Získané hodnoty těchto mechanických vlastností zároveň vykazovaly nejlepší shodu se zmíněnými studiemi. V případě modulu pružnosti v tahu byly hodnoty zjištěné reálnými zkouškami téměř totožné s teoretickými hodnotami vypočtenými v člancích [5,20].

Relativní hustota je pak základní charakteristickou veličinou mikroprutové struktury. Vyjadřuje poměr hustoty dané struktury k hustotě základního materiálu a tím pádem není závislá na geometrickém uspořádání. S ohledem na praktické aplikace strukturovaného materiálu (například deformační zóny automobilů, [22]) je výhodné tento parametr porovnávat s relativní měrnou absorbovanou energií (viz kapitola 5.2.3). Z experimentů vyplývá že relativní SAE je téměř přímo úměrná relativní hustotě. I v tomto případě byly experimentálně zjištěné hodnoty porovnatelné s experimentálními výsledky prezentovanými ve studii [6] (viz obr. 6.2).



Obr. 6.2 Porovnání získaných dat (vlevo) s výsledky studie [6] (vpravo)



## 7. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo nalezení vhodných kritérií pro porovnání mikroprutových struktur a jejich vyhodnocení. Jelikož jsou mechanické vlastnosti těchto struktur relativně málo prozkoumanou oblastí, byla tato práce zaměřena na vytvoření skriptu pro rychlé vyhodnocení testů a získání materiálových konstant. Skript byl následně kalibrován a testován na základě výsledků rešeršní části a již provedených experimentů.

Nejprve byly v rešeršní části shrnuty základní typy mikroprutových struktur a jejich charakteristické rozměry a veličiny. Bylo popsáno jejich mechanické chování a vlastnosti při různém způsobu zatížení. Byly také popsány vhodné testovací metody strukturovaného materiálu.

Dále byla vyhodnocena vhodná porovnávací kritéria a všechny potřebné veličiny nutné k jejich určení. Výsledkem byl výčet materiálových konstant, které bylo nutné získat. Tyto konstanty pak mohou sloužit k predikci mechanických vlastností pomocí numerických řešičů při optimalizaci materiálového modelu skutečného materiálu.

Následně byla popsána testovací tělesa a průběh tahových a tlakových testů vzorků vyrobených metodou SLM z materiálu AlSi10Mg navržených a testovaných v práci [5]. Byly zde provedeny tlakové zkoušky celkem 4 typů porézních struktur. V případě tlakových zkoušek byly použity 2 typy testovaných mikroprutových struktur.

Na základě rešeršní části vytvořen skript pro vyhodnocení mechanických testů v programu MS Excel. Skript umožňuje rychlé a snadné vyhodnocení velkého množství dat, které je jinak velmi komplikované. Vyhodnocená data jsou pak vizuálně zpracována na úrovni vzorku, sady a celého souboru. Ve skriptu dále jsou zahrnuty všechny běžné metody určení materiálových konstant, ze kterých jsou pak vyvozena porovnávací kritéria jednotlivých vzorků. Pro testování a kalibraci skriptu byla použita data z experimentálního testování v práci [5].

Získané hodnoty byly porovnány s hodnotami prezentovanými v dalších vědeckých studiích a člancích. Na základě tohoto porovnání byla provedena finální kalibrace vytvořeného skriptu.

Během práce byl potvrzen vliv velikosti základní buňky a průměru prutů na mechanické vlastnosti mikroprutových struktur. Dále bylo zjištěno, že pro získání přesných materiálových konstant je nejprve provést rozměrovou analýzu těles. Pro další zpřesnění těchto konstant je nutný výzkum v oblasti deformačních mechanismů strukturovaného materiálu při statickém a dynamickém zatěžování. Další možnou oblastí pro výzkum je zkoumání příčin lepších mechanických vlastností u struktur vyráběných pod úhlem 45 stupňů. Proto je nutné se touto problematikou dále zabývat.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

**8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] TREVISAN, Francesco, Flaviana CALIGNANO, Massimo LORUSSO, Jukka PAKKANEN, Alberta AVERSA, Elisa AMBROSIO, Mariangela LOMBARDI, Paolo FINO a Diego MANFREDI, 2017. On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials* [online]. 10(1), 76. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10010076
- [2] The World's First 3D Printed Turbocharger. *Turbo Dynamics* [online]. Dorset: Turbo Dynamics, 2014 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.turbodynamics.co.uk/media/blog/3d-printed-turbocharger>
- [3] Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). *Konstrukter* [online]. Brno: Nová média, 2016 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [4] „Vypečená“ konzola míří z tiskárny do vesmíru. *Zprávy z VUT* [online]. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, 2015 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/vypecena-konzola-miri-z-tiskarny-do-vesmiru-d103894?aid\\_redir=1](https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/vypecena-konzola-miri-z-tiskarny-do-vesmiru-d103894?aid_redir=1)
- [5] VRÁNA, R. Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 96 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [6] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas, Adriaan B. SPIERINGS a Dirk MOHR, 2016. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 116, 14–28. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.05.054
- [7] GÜMRÜK, Recep, R. A W MINES a Sami KARADENIZ, 2013. Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Materials Science and Engineering A* [online]. B.m.: Elsevier, 586, 392–406. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2013.07.070
- [8] MAGER, Voicu, Nicolae BÂLC, Dan LEORDEAN, Cristian DUDESCU a Mathias FOCKELE, 2013. Research on Producing Complex Metal Parts with Lattice Structure by Selective Laser Melting. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 371, 280–284. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.371.280

- [9] LABEAS, G, E PTOCHOS, 2013. Investigation of sandwich structures with innovative cellular metallic cores under low velocity impact loading. *Plastics, Rubber and Composites* [online]. 42(5), 194–202. ISSN 1465-8011. Dostupné z: doi:10.1179/1743289811Y.00000000056
- [10] ŠLAIS, M. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/12576>.  
Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Forejt.
- [11] JOHNSON, G. R., COOK W. H. *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures*. Engineering Fracture Mechanics, 1985, vol. 21, no. 1, p. 31-48
- [12] GRYTTEN, Frode, 2008. *Low-Velocity Penetration of Aluminium Plates*. ISBN 9788247168264.
- [13] KAY, G J, 2003. Failure Modelling of Titanium 6Al-4V and Aluminum 2024-T3 With the Johnson-Cook Material Model. *DOT Report* [online]. DOT/FAA/AR(September), 1–24. Dostupné z: [papers2://publication/uuid/92BFA8F6-3647-47FA-B137-1EB6A259DE32](https://papers2://publication/uuid/92BFA8F6-3647-47FA-B137-1EB6A259DE32)
- [14] Laser Beam Melting System SLM 280 HL. SLM SOLUTIONS GMBH. *SLM Solutions GmbH* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://stage.slmsolutions.com/download.php?f=61008aff89ca6259285ee7f35052f942>
- [15] ČERVINEK, O. *Prostorové 3D struktury pro aplikaci v technologii Selective Laser Melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vrána
- [16] Equipments. *Research Center of Polymer Product Engineering* [online]. Zhejiang: Polymer Engineering Science and technology innovation team [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://che.zju.edu.cn/polymer/en/keyanpingtai.php?page=4>
- [17] KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2012, vol. 39, s. 439-446. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.059. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212025862>
- [18] 3D Printing: Titanium, Carbon Fiber, & The One:1. In: *Inside Koenigsegg* [dokumentární seriál]. Accelerator Media Partners 2014, 15. 4. 2014. /DRIVE. Dostupné též z: <https://www.youtube.com/watch?v=Dw6cs7opvzA&index=10&list=PLHa6PXrV-yIgnXSYFT07BouKhEhyFuWnf>

- [19] SLM Metal Powder. *SLM Solutions* [online]. Lübeck [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slm-metal-powder>
- [20] GÜMRÜK, R. a R.A.W. MINES. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, vol.68, s. 125-139. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.01.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740313000118>
- [21] GODINO MARTINEZ, Miguel. *AlSi10Mg parts produced by selective laser melting (SLM)*. Madrid, 2013. Universidad Carlos III De Madrid.
- [22] JACOB, G C, J F FELLERS, S SIMUNOVIC a J M STARBUCK, 2002. Energy absorption in polymer composites for automotive crashworthiness. *Journal of Composite Materials* [online]. 36(7), 813–850. ISSN 00219983. Dostupné z: doi:10.1106/002199802023164
- [23] LEARY, Martin, Maciej MAZUR, Joe ELAMBASSERIL, Matthew MCMILLAN, Thomas CHIRENT, Yingying SUN, Ma QIAN, Mark EASTON a Milan BRANDT, 2016. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 98, 344–357. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.02.127

**9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ****9**

---

**Zkratky**

AM	- Additive Manufacturing
CAD	- Computer Aided Design
SLM	- Selective Laser Melting
DMLS	- Direct Metal Laser Sintering
EBM	- Electron Beam Melting
BCC	- Body Centred Cubic
FEM	- Finite Element Method
MKP	- metoda konečných prvků
SAE	- Specific Energy Absorption

**Symboly**

$\bar{\rho}$ [-]	- relativní hustota
$\psi$ [KJkg <sup>-1</sup> ]	- měrná absorbovaná energie
E MPa	- modul pružnosti materiálu
R <sub>p0,2%</sub> MPa	- smluvní mez kluzu materiálu
R <sub>m</sub> MPa	- mez pevnosti materiálu
$\varepsilon$ 1	- poměrné prodloužení materiálu
F N	- síla
$\sigma$ MPa	- napětí
P %	- porozita
D 1	- Damage parameter
S mm <sup>2</sup>	- plocha průřezu prutu
S <sub>b</sub> mm <sup>2</sup>	- zátěžná plocha - půdorys
S <sub>min</sub> mm <sup>2</sup>	- zátěžná plocha - minimální
S <sub>max</sub> mm <sup>2</sup>	- zátěžná plocha – maximální
$\psi_{REL}$ 1	- relativní měrná absorbovaná energie

## 10. SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 1.1</b> Unikátní variabilní turbodmychadlo automobilky Koenigsegg vyrobené pomocí technologie kovového 3D tisku. Patentovaný systém vnitřních kanálů je konvenčním způsobem nevyrobitelný. [2]	12
<b>Obr. 1.2</b> Ultralehká konzola komunikačních antén satelitu vyrobená metodou SLM [4]	123
<b>Obr. 2.1</b> Schématické nákres metody SLM [5]	14
zařízení (typ Renishaw AM400) [3]	15
<b>Obr. 2.2</b> Schéma výrobního zařízení (typ Renishaw AM400) [3]	15
<b>Obr. 2.3</b> Mikrostruktura hliníkového prášku [1]	15
<b>Obr. 2.4</b> Lopatky turbín s vnitřními chladicími kanály vyrobené ze superslitiny	16
<b>Obr. 2.5</b> (a) Buňka oktaedrické (BCC) mřížky, (b) geometrie prutu [6]	17
<b>Obr. 2.6</b> Měrná absorbovaná energie jako funkce relativní hustoty nemodifikovaných prutů [6]	18
<b>Obr. 2.7</b> Vliv rychlosti zatěžování na chování materiálu [6]	19
<b>Obr. 2.8</b> Typy použitých mřížek [7]	19
<b>Obr. 2.9</b> Série bloků s různou velikostí buněk (velikost 20 x 20 x 20 mm) [7]	20
<b>Obr. 2.10</b> (a) Schematické znázornění testovací aparatury Arcan, (b) Ukázka testování na smyk [7]	20
<b>Obr. 2.11</b> Výsledné zatěžovací křivky ze zkoušky smykem pro buňku velikosti	21
(a) 2,5 mm (b) 1,25 mm [7]	21
<b>Obr. 2.12</b> Zatěžovací křivka tlakové zkoušky s omezenou deformací a příslušný stav vzorku (BCC) [7]	21
<b>Obr. 2.13</b> Zatěžovací křivka tlakového testu bez	22
omezení deformace (BCC, velikost buňky 2,5 mm) [7]	22
<b>Obr. 2.14</b> Zatěžovací křivka tlakového testu bez omezení deformace (BCCZ, velikost buňky 2,5 mm) [7]	22
<b>Obr. 2.15</b> Porovnání deformace mřížky BCCZ o velikosti buňky (a) 2,5 mm, (b) 1,25 mm [7]	23
<b>Obr. 2.16</b> Tahová zkouška (BCC, 2,5mm) [7]	23
<b>Obr. 2.17</b> Buňka BCC (a) a buňka BCCZ(b) [8]	24
<b>Obr. 2.18</b> Podpůrné konstrukce vzorků pro ohybové testy (a) a tlakové testy (b)	24
<b>Obr. 2.19</b> Orientace zatěžující síly pod úhlem 90° (vlevo) a 0° (vpravo)	25
<b>Obr. 2.20</b> Závislost velikosti deformace na velikosti a orientaci buňky vůči zatěžující síle (vlevo) a jasně patrná plastická deformace vzorků po ohybové zkoušce (vpravo)	25
<b>Obr. 2.21</b> a) Laminární (sendvičový kompozit) b) Struktura jádra je tvořena buňkami BCC [9]	26
<b>Obr. 2.22</b> Vzorek připraven v testovacím zařízení [9]	27
<b>Obr. 4.1</b> Zařízení SLM 280 <sup>HL</sup> firmy SLM Solutions [14]	31
<b>Obr. 4.2</b> Aparatura pro materiálové testování Zwick Z020 [16]	32
<b>Obr. 4.3</b> Zkušební prutová tělesa pro tahové testy na pracovní platformě SLM 280 HL	33
<b>Obr. 4.4</b> Část pracovní přímky před lineární oblastí (vlevo), znázornění vyhodnocení modulu pružnosti E ze závislosti napětí - poměrné prodloužení (vpravo) [7]	34
<b>Obr. 4.5</b> Ukázka výpočtu $R_{p0,2}$ pomocí vytvořeného skriptu	35

<b>Obr. 4.6</b> Porovnání výsledků závislosti $\sigma$ - $\epsilon$ s vyznačenými maximálními hodnotami sledovaných veličin v rámci jedné sady	35
<b>Obr. 4.7</b> Souhrnné zobrazení závislosti $\sigma$ - $\epsilon$	36
<b>Obr. 4.8</b> Základní buňka typu BCC (vlevo), testovací vzorek BCC20_4_0,5 (vpravo)	36
<b>Obr. 4.9</b> Plocha průřezu $S_j$ (vlevo) a $S_e$ (vpravo)	38
<b>Obr. 4.10</b> Určení modulu pružnosti struktury pomocí skriptu	39
<b>Obr. 5.1</b> Srovnání tahových křivek testovaných vzorků	40
<b>Obr. 5.2</b> Záznam tahových zkoušek pro plochu $S_b$ . Nestandardní průběh vzorku typu A číslo 3 je zde jasně viditelný	42
<b>Obr. 5.3</b> Tlaková zkouška mikroprutových struktur $\phi$ 1 mm (nahore) a $\phi$ 0,5 mm (dole)	43
<b>Obr. 5.4</b> Vypočtené hodnoty relativní SAE jednotlivých vzorku (nahore) a závislost Relativní SAE – Relativní hustota (dole)	44
<b>Obr. 6.1</b> Tahové křivky testovacích vzorků po zavedení reálných parametrů.	45
<b>Obr. 6.2</b> Porovnání získaných dat (vlevo) s výsledky studie [6] (vpravo)	46

**11** 

---

**11. SEZNAM TABULEK**

<b>Tab. 4.1</b>	Obsahy zátěžných ploch	38
<b>Tab 5.1</b>	Naměřené hodnoty $R_m$	40
<b>Tab. 5.2</b>	Shrnutí výsledků $R_{p0,2}$	41
<b>Tab 5.3</b>	shrnutí hodnot modulu pružnosti $E$	41
<b>Tab 5.4</b>	Aritmetické průměry hodnot meze pevnosti	42
<b>Tab. 5.5</b>	Získané hodnoty modulu pružnosti struktur	43



## **12. SEZNAM PŘÍLOH**

**12**

---

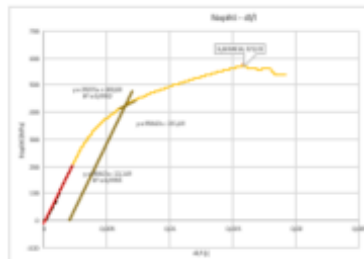
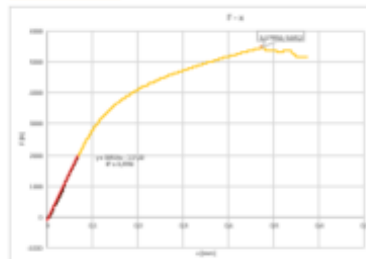
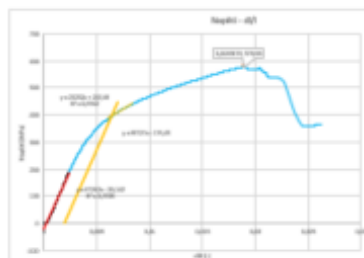
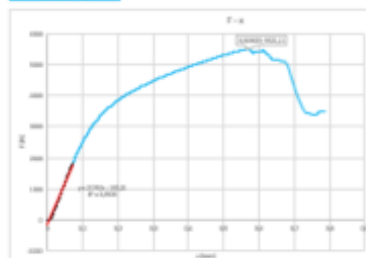
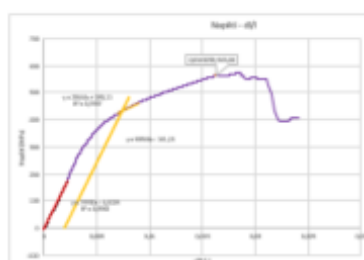
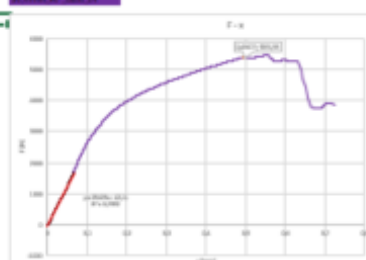
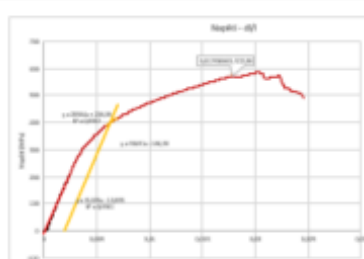
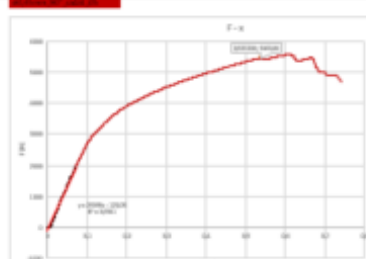
V přílohách je zobrazen vzhled skriptu. Kompletní skript byl odevzdán v digitální formě vedoucímu práce při odevzdání bakalářské práce.

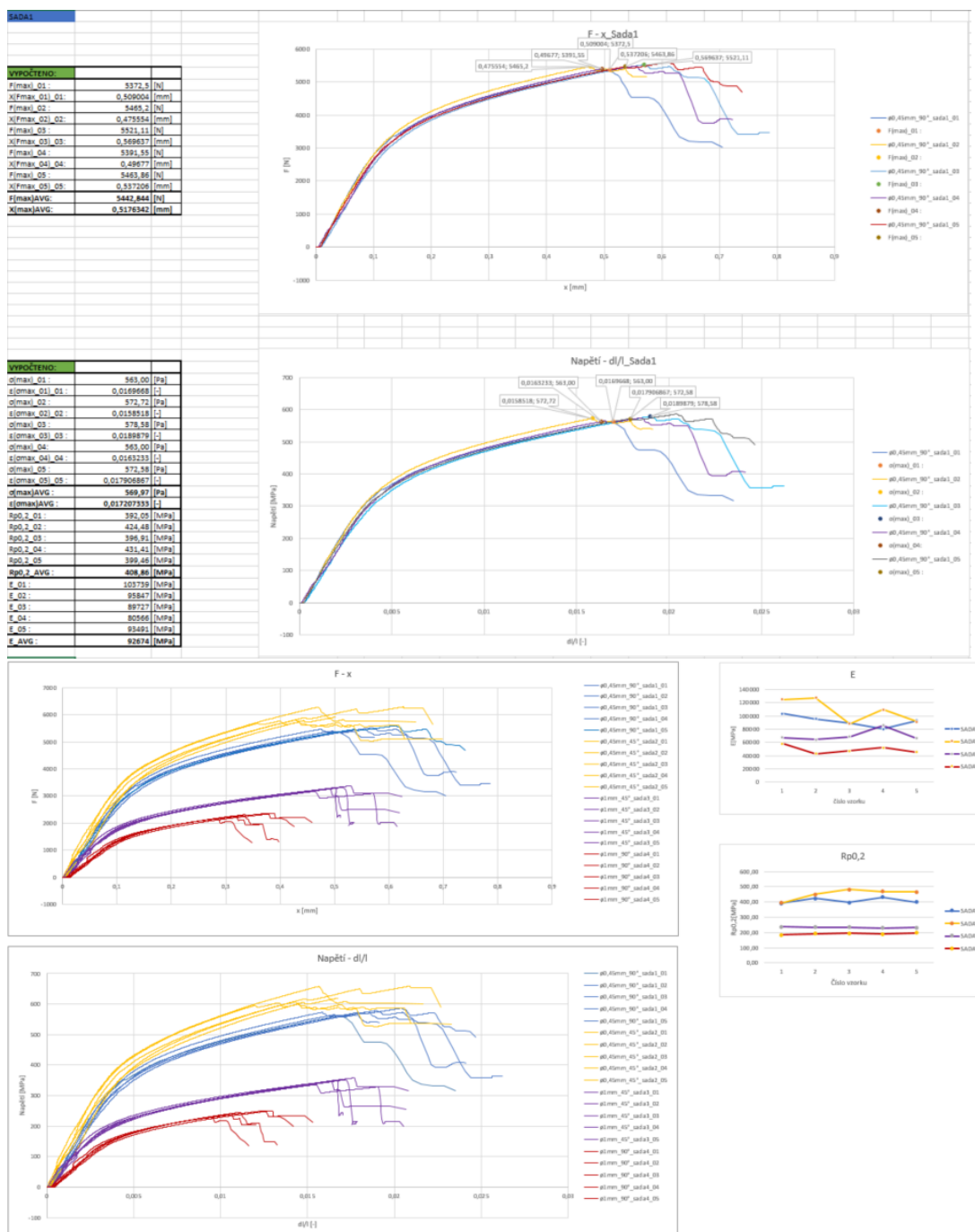
PŘÍLOHA I – Vzhled skriptu pro zpracování tahové zkoušky

PŘÍLOHA II – Vzhled skriptu pro zpracování tlakové zkoušky

## TAHOVÁ ZKOUŠKA

<b>VSTUP:</b>	Sada1	
Průměr prutu:		0,45 [mm]
Délka prutu:		30 [mm]
Počet prutů:		60 [-]
Úhel stavby:		90 [°]
<b>Průřez prutu:</b>		0,159043128 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Celkový průřez:</b>		9,542587685 [mm <sup>2</sup> ]
<b>VSTUP:</b>	Sada2	
Průměr prutu:		0,45 [mm]
Délka prutu:		30 [mm]
Počet prutů:		60 [-]
Úhel stavby:		45 [°]
<b>Průřez prutu:</b>		0,159043128 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Celkový průřez:</b>		9,542587685 [mm <sup>2</sup> ]
<b>VSTUP:</b>	Sada3	
Průměr prutu:		1 [mm]
Délka prutu:		30 [mm]
Počet prutů:		12 [-]
Úhel stavby:		45 [°]
<b>Průřez prutu:</b>		0,785398163 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Celkový průřez:</b>		9,424777961 [mm <sup>2</sup> ]
<b>VSTUP:</b>	Sada4	
Průměr prutu:		1 [mm]
Délka prutu:		30 [mm]
Počet prutů:		12 [-]
Úhel stavby:		90 [°]
<b>Průřez prutu:</b>		0,785398163 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Celkový průřez:</b>		9,424777961 [mm <sup>2</sup> ]

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]



VÝSLEDKY		Sada1	ø0,45mm 90°	Variační rozpětí:		Variační rozpětí (%)	
F(max)AVG :	5442,844	[N]	Interval F(max):	< 5372,5 ; 5521,11 >	148,61	[N]	2,730374047
x(MAX)avg :	0,5176342	[mm]	Interval x(MAX):	< 0,475554 ; 0,569637 >	0,094083	[mm]	18,1755765
Rm_AVG :	569,97	[MPa]	Interval Rm:	< 563,00242420491 ; 578,575768134383 >	15,57	[MPa]	2,732286652
ε(σmax)AVG :	0,017207333	[-]	Interval ε(σmax):	< 0,0158518 ; 0,0189879 >	0,0031361	[-]	18,22536903
E_AVG :	92674	[MPa]	Interval E:	< 80566 ; 103739 >	23173	[MPa]	25,00485573
Rp0,2_AVG :	408,86	[MPa]	Interval Rp0,2:	< 392,045041724985 ; 431,411309360617 >	39,37	[MPa]	9,628252407

VÝSLEDKY		Sada2	ø0,45mm 45°		Variační rozpětí:		Variační rozpětí (%)	
F(max)AVG :		5872,682	[N]	Interval F(max):	< 5662,06 ; 6275,03 >	612,97	[N]	10,43765012
x(MAX)avg :		0,4271882	[mm]	Interval x(MAX):	< 0,355854 ; 0,469179 >	0,113325	[mm]	26,52812039
Rm_AVG :		615,42	[MPa]	Interval Rm:	< 593,346394787093 ; 657,581591802427 >	64,24	[MPa]	10,43765012
ε(σmax)AVG :		0,014239607	[-]	Interval ε(σmax):	< 0,0118618 ; 0,0156393 >	0,0037775	[-]	26,52812039
E_AVG :		108474	[MPa]	Interval E:	< 88558 ; 127654 >	39096	[MPa]	36,04181647
Rp0,2_AVG :		452,66	[MPa]	Interval Rp0,2:	< 394,247154608512 ; 482,685397600859 >	88,44	[MPa]	19,53737315

VÝSLEDKY	Sada3	ø1mm 45°	Variační rozpětí:	Variační rozpětí [%]	
F(max)AVG :	3280,724 [N]	Interval F(max):	< 3162,06 ; 3373,24 >	211,18 [N]	6,436993786
x(MAX)avg :	0,5003352 [mm]	Interval x(MAX):	< 0,462807 ; 0,530637 >	0,06783 [mm]	13,55691145
Rm_AVG :	348,10 [MPa]	Interval Rm:	< 335,504986235439 ; 357,91188015687 >	22,41 [MPa]	6,436993786
ε(σmax)AVG :	0,01667784 [-]	Interval ε(σmax):	< 0,0154269 ; 0,0176879 >	0,002261 [-]	13,55691145
E_AVG :	70487 [MPa]	Interval E:	< 64277 ; 85639 >	21362 [MPa]	30,30629762
Rp0,2_AVG :	233,44 [MPa]	Interval Rp0,2:	< 228,891082394995 ; 236,890361912135 >	8,00 [MPa]	3,426719798

VÝSLEDKY		Sada4	ø1mm 90°	Variační rozpětí:	Variační rozpětí [%]	
F(max)AVG :	2294,912	[N]	Interval F(max):	< 2168,55 ; 2361,23 >	192,68 [N]	8,395964638
x(MAX)avg :	0,340896	[mm]	Interval x(MAX):	< 0,286158 ; 0,389196 >	0,103038 [mm]	30,22564066
Rm_AVG :	243,50	[MPa]	Interval Rm:	< 230,090301227953 ; 250,534284184584 >	20,44 [MPa]	8,395964638
ε(σmax)AVG :	0,0113632	[-]	Interval ε(σmax):	< 0,0095386 ; 0,0129732 >	0,0034346 [-]	30,22564066
E_AVG :	49077,8	[MPa]	Interval E:	< 42736 ; 58060 >	15324 [MPa]	31,22389349
Rp0,2_AVG :	191,65	[MPa]	Interval Rp0,2:	< 183,939880157351 ; 197,30423046875 >	13,36 [MPa]	6,973422236

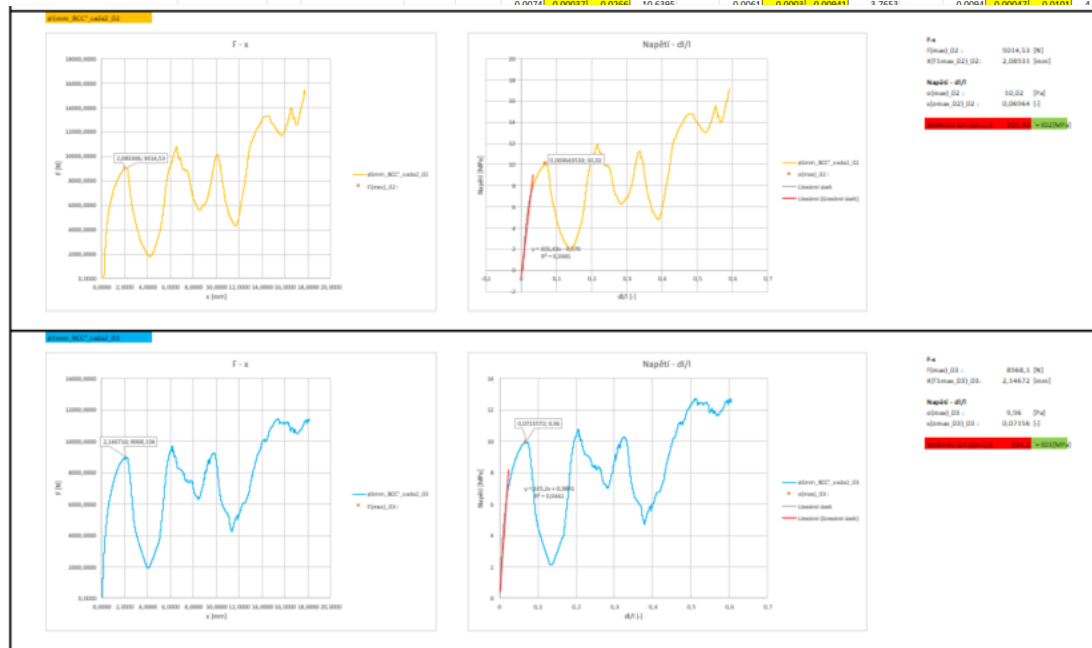
F(max) [N]				ε(σmax) [-]					
sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4	sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4		
vzorek č.	ø0,45mm 90°	ø0,45mm 45°	ø1mm 45°	ø1mm 90°	vzorek č.	ø0,45mm 90°	ø0,45mm 45°	ø1mm 45°	ø1mm 90°
1	5372,5	5727,15	3303,42	2361,23	1	0,0169668	0,0145033	0,016801	0,012596
2	5465,2	6275,03	3311,11	2360,78	2	0,0158518	0,0156393	0,0171664	0,0129732
3	5521,11	5807,43	3253,79	2312,74	3	0,0189879	0,014316133	0,016307	0,0111047
4	5391,55	5662,06	3373,24	2168,55	4	0,0163233	0,0118618	0,0176879	0,0095386
5	5463,86	5891,74	3162,06	2271,26	5	0,017906867	0,01	0,0154269	0,0106035
AVG:	5442,844	5872,682	3280,724	2294,912	AVG:	0,017207333	0,014239607	0,01667784	0,0113632
x(MAX) [mm]				E [MPa]					
sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4	sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4		
vzorek č.	ø0,45mm 90°	ø0,45mm 45°	ø1mm 45°	ø1mm 90°	vzorek č.	ø0,45mm 90°	ø0,45mm 45°	ø1mm 45°	ø1mm 90°
1	0,509004	0,435099	0,50403	0,37788	1	103739	124886	67625	58060
2	0,475554	0,469179	0,514992	0,389196	2	95847	127654	64277	42736
3	0,569637	0,429484	0,48921	0,333141	3	89727	88558	68909	47433
4	0,49677	0,355854	0,530637	0,286158	4	80566	109792	85639	51837
5	0,537206	0,446325	0,462807	0,318105	5	93491	91480	65985	45323
AVG:	0,5176342	0,4271882	0,5003352	0,340896	AVG:	92674	108474	70487	49077,8
Rm [MPa]				Rp0,2 [MPa]					
sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4	sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4		
vzorek č.	ø0,45mm 90°	ø0,45mm 45°	ø1mm 45°	ø1mm 90°	vzorek č.	ø0,45mm 90°	ø0,45mm 45°	ø1mm 45°	ø1mm 90°
1	563,00	600,17	350,50	250,53	1	392,05	394,25	236,89	183,94
2	572,72	657,58	351,32	250,49	2	424,48	449,48	234,41	192,89
3	578,58	608,58	345,24	245,39	3	396,91	482,69	234,46	195,13
4	563,00	593,35	357,91	230,09	4	431,41	470,12	228,89	188,97
5	572,58	617,42	335,50	240,99	5	399,46	466,77	232,54	197,30
AVG:	569,97	615,42	348,10	243,50	AVG:	408,86	452,66	233,44	191,65

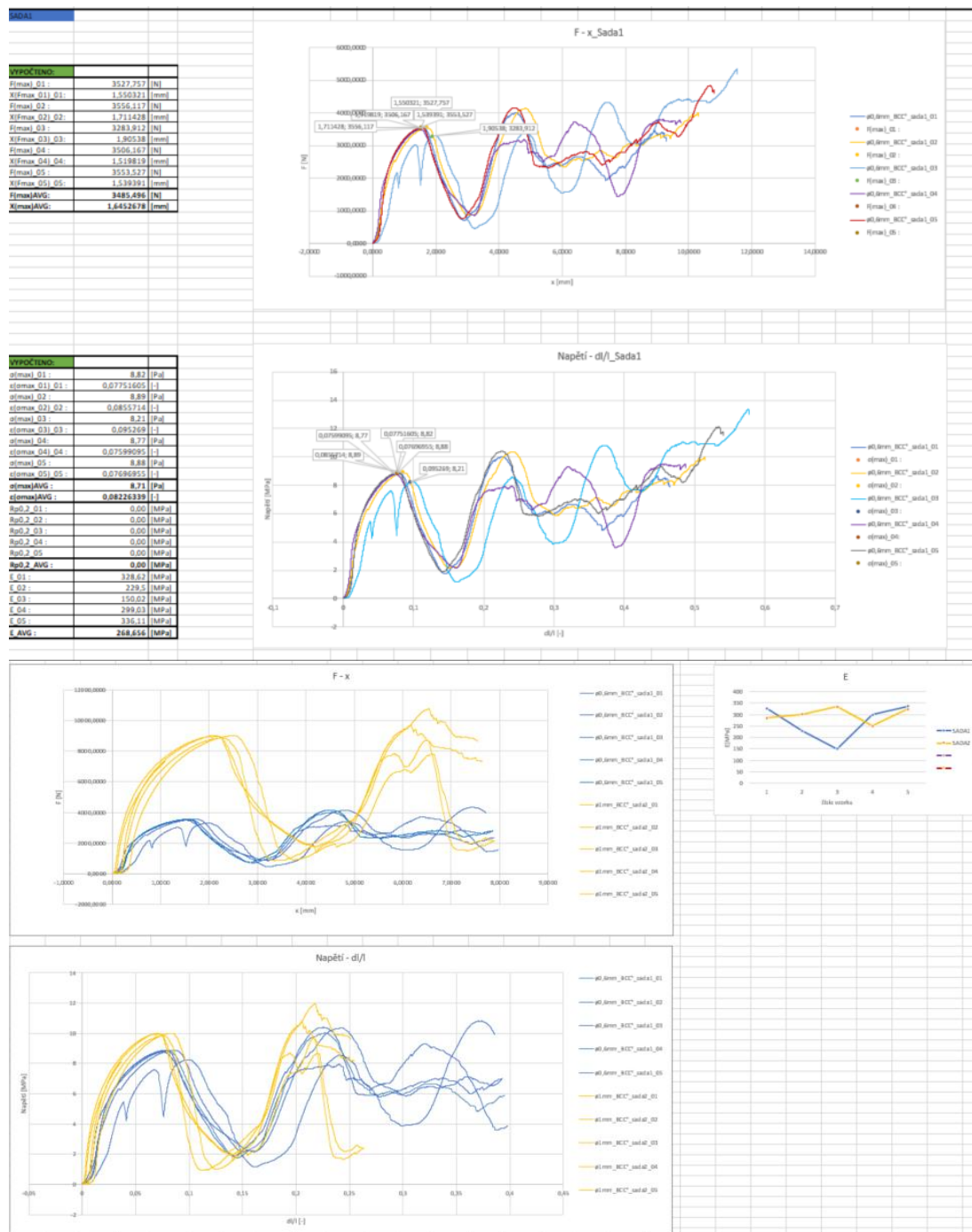
## TLAKOVÁ ZKOUŠKA

VSTUP	Sada1	
Průměr prutu:	0,6 [mm]	
velikost vzorku:	20 [mm]	
velikost buňky:	4 [mm]	
Typ struktury:	BCC [mm]	
Relativní hustota:	0,122431497 [-]	
Celkový průřez:	400 [mm <sup>2</sup> ]	

VSTUP	Sada2	
Průměr prutu:	1 [mm]	
velikost vzorku:	30 [mm]	
velikost buňky:	6 [mm]	
Typ struktury:	BCC [mm]	
Relativní hustota:	0,151149947 [-]	
Celkový průřez:	900 [mm <sup>2</sup> ]	

VSTUP				VSTUP				VSTUP			
a0,6mm_BCC_sada1_01				a0,6mm_BCC_sada1_02				a0,6mm_BCC_sada1_03			
Def. X	d/l ε	Napětí σ	Sila F	Def. X	d/l ε	Napětí σ	Sila F	Def. X	d/l ε	Napětí σ	Sila F
[mm]	[-]	[MPa]	[N]	[mm]	[-]	[MPa]	[N]	[mm]	[-]	[MPa]	[N]
KONTROL KONTROL KONTROL KONTROL				KONTROL KONTROL KONTROL KONTROL				KONTROL KONTROL KONTROL KONTROL			
0,0000	0	0	0,0000	0,0000	0	0,00269	1,0774	0,0000	0	0,00235	0,935
0,0000	0	0	0,0000	0,0000	0	0,00261	1,0428	0,0000	0	0,00226	0,904
0,0000	0	0	0,0000	0,0000	0	7,2E-11	0,0000	0,0000	0	2,9E-11	0,000
0,0000	0	0	0,0000	0,0000	0	-4,4E-12	0,0000	0,0000	0	-9E-13	0,000
0,0000	0	0	0,0000	0,0000	0	0,000016	0,0036	0,0000	0	0,000017	0,006
0,0000	0	0,01097	4,3871	0,0000	0	0,00605	2,4181	0,0000	0	0,00596	2,381
0,0000	0	0,01097	4,3871	0,0000	0	0,00596	2,3835	0,0000	0	0,00518	2,072
0,0000	0	0,0101	4,0416	0,0000	0	0,0057	2,2799	0,0000	0	0,00518	2,072
0,0000	1,7E-06	0,0101	4,0416	0,0000	4,3E-07	0,0057	2,2799	0,0000	6,7E-07	0,00518	2,072
0,0000	1,4E-06	0,01019	4,0762	0,0000	1,3E-06	0,00544	2,1763	0,0000	9,7E-07	0,0051	2,038
0,0000	5,1E-07	0,0101	4,0416	0,0000	1E-06	0,00553	2,2108	0,0000	6,7E-07	0,00518	2,072
0,0000	-7E-08	0,01028	4,1107	0,0000	7,2E-07	0,00561	2,2454	0,0000	5,8E-08	0,00501	2,003
0,0000	-3,6E-07	0,01036	4,1453	0,0000	1,3E-06	0,00544	2,1763	0,0001	3,4E-06	0,0051	2,038
0,0000	-9,5E-07	0,01054	4,2144	0,0000	4,3E-07	0,0057	2,2799	0,0000	-8,2E-07	0,00527	2,101
0,0000	-1,2E-06	0,01062	4,2489	0,0000	7,2E-07	0,00561	2,2454	0,0000	6,7E-07	0,00518	2,072
0,0000	-1,5E-06	0,01071	4,2834	0,0000	1,4E-07	0,00579	2,3144	0,0000	3,8E-07	0,00527	2,101
0,0000	-1,8E-06	0,01079	4,3180	0,0000	-1,6E-07	0,00587	2,3490	0,0000	1,9E-06	0,00518	2,072
0,0000	-1,5E-06	0,01071	4,2834	0,0000	4,3E-07	0,0057	2,2799	0,0000	2,2E-06	0,0051	2,038
0,0000	-9,5E-07	0,01054	4,2144	0,0000	1,4E-07	0,00579	2,3144	0,0000	1,9E-06	0,00518	2,072
0,0000	-1,2E-06	0,01062	4,2489	0,0000	7,2E-07	0,00561	2,2454	0,0000	7E-07	0,00553	2,214
0,0001	3E-06	0,01114	4,4562	0,0000	1E-06	0,00553	2,2108	0,0005	2,3E-05	0,00596	2,381
0,0003	1,5E-05	0,01218	4,8707	0,0000	-1,6E-07	0,00587	2,3490	0,0016	8E-05	0,00622	2,481
0,0012	5,8E-05	0,01364	5,4579	0,0002	7,7E-06	0,00639	2,5562	0,0029	0,00014	0,00708	2,832
0,0024	0,00012	0,01572	6,2870	0,0009	4,6E-05	0,00691	2,7635	0,0043	0,00022	0,00769	3,074
0,0036	0,00018	0,01838	7,3578	0,0021	0,0001	0,0076	3,0399	0,0056	0,00028	0,00829	3,314
0,0048	0,00024	0,0209	8,3596	0,0035	0,00017	0,00829	3,3162	0,0069	0,00034	0,00881	3,523
0,0061	0,0003	0,02366	9,4650	0,0048	0,00024	0,00881	3,5235	0,0081	0,00041	0,00959	3,834





strana  
**61**